

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS JURÍDICAS E ECONÔMICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA**

**FILIPE LUBE**

**ENERGIA DO HIDROGÊNIO:  
MUDANÇAS PARADIGMÁTICAS RUMO À UMA  
“ECONOMIA VERDE” NO BRASIL**

**VITÓRIA  
2012**

**FILIPPE LUBE**

**ENERGIA DO HIDROGÊNIO:  
MUDANÇAS PARADIGMÁTICAS RUMO À UMA  
“ECONOMIA VERDE” NO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia do Centro de Ciências Jurídicas e Econômicas da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Economia.  
Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Sonia Maria Dalcomuni

VITÓRIA  
2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

L928e Lube, Filipe, 1982-  
Energia do hidrogênio : mudanças paradigmáticas rumo à  
uma “economia verde” no Brasil / Filipe Lube. – 2012.  
141 f. : il.

Orientadora: Sonia Maria Dalcomuni.  
Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade  
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Jurídicas e  
Econômicas.

1. Desenvolvimento sustentável - Brasil. 2. Energia - Fontes  
alternativas. I. Dalcomuni, Sonia Maria. II. Universidade Federal  
do Espírito Santo. Centro de Ciências Jurídicas e Econômicas.  
III. Título.

CDU: 330

---

**FILIPPE LUBE**

**ENERGIA DO HIDROGÊNIO:  
MUDANÇAS PARADIGMÁTICAS RUMO À UMA  
“ECONOMIA VERDE” NO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Economia do Centro de Ciências Jurídicas e Econômicas da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Economia.

Aprovada em 28, de junho de 2012.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Sonia Maria Dalcomuni**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

---

**Prof.<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Aurélia Hermínia Castiglioni**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

---

**Dr. Elyas Ferreira de Medeiros**  
**Centro de Gestão e Estudos Estratégicos**

A meus pais por sempre me apoiarem,  
aos amigos que me ajudaram nessa  
longa caminhada e especialmente a  
Daniele, a companheira de todos os  
momentos com quem compartilho o  
desejo de viver.

## **AGRADECIMENTOS**

Foram muitas as contribuições para o desenvolvimento desta dissertação, a quem dirijo os meus agradecimentos. Em especial, à professora Sonia Dalcomuni por sua disponibilidade em ajudar na construção deste trabalho, me proporcionando esta oportunidade de pesquisa e que graças a sua experiência acadêmica e dedicação este trabalho foi possível. Aos membros da banca, Aurélia Hermínia Castiglioni e Elyas Ferreira de Medeiros, pela disposição por aceitar o convite e contribuir com este trabalho. Aos professores do mestrado pela formação acadêmica proporcionada e que contribuíram para a construção desta dissertação. À empresa H2 Brasil Fuel Cell que disponibilizou vários documentos, dados e informações pelo site e por e-mail que foram úteis na construção deste trabalho. Agradeço também ao Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação e o Ministério de Minas e Energia por colaborar nas pesquisas, enviando os documentos oficiais elaborados por estes órgãos a fim de contribuir para o debate. E não poderia deixar de agradecer aos meus pais por nunca me deixarem desistir, aos amigos por compreenderem a minha ausência e a Daniele, minha esposa e minha paixão, pelo apoio incondicional nessa caminhada.

“A idade da pedra não acabou por falta de pedras, e a era dos combustíveis fósseis tampouco terminará pelo esgotamento do petróleo, do gás natural e do carvão”.

José Santamarta Flórez.

## RESUMO

Esta dissertação analisa o desenvolvimento da energia do hidrogênio no Brasil, numa perspectiva de mudança paradigmática. A perspectiva da sustentabilidade do desenvolvimento e de “economia verde” basilar no presente trabalho requer mudança de paradigma no setor energético. A energia é fundamental para a melhoria da qualidade de vida e do bem estar da população, porém é necessário buscar novas fontes de energias, limpas e renováveis, alternativamente às fontes de origem fóssil, e que possam sustentar o crescimento econômico. Esta busca tem-se intensificado em todo o mundo e a energia provida pelo hidrogênio tem sido investigada como uma alternativa para o desenvolvimento de uma nova economia menos emissora de carbono. Este trabalho provê um panorama do desenvolvimento da energia do hidrogênio internacionalmente. Identifica e analisa iniciativas para o desenvolvimento da energia do hidrogênio no Brasil. Conclui que nas políticas do setor energético brasileiro a energia do hidrogênio ainda está ausente. Em termos de estudos estratégicos, importantes trabalhos foram desenvolvidos no âmbito do Governo Federal (Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI, Ministério de Minas e Energia – MME e Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE). Conclui-se finalmente que não se identificam gargalos no que tange à fontes de oferta de energia no Brasil, como também são múltiplas as alternativas para o progressivo “esverdeamento” da matriz energética. Entretanto, observa-se no planejamento energético brasileiro uma postura passiva limitada à preocupações com a segurança energética, risco de “apagão”; tímido, portanto na exploração da grande potencialidade energética que o país apresenta; e que poderia ter como meta a transformação do Brasil em país exportador de energia. O hidrogênio, por seu turno, que no país e no mundo permanece apenas no plano dos estudos prospectivos, com poucas experiências comerciais, revela-se como uma das melhores alternativas técnicas para a geração limpa de energia elétrica, porém, a generalização de seu uso ainda requer avanços em termos de redução de seus custos de produção via definição de políticas de investimento para barateamento de equipamentos, criação de infra-estrutura de distribuição e ampliação de demanda.

Palavras chaves: Desenvolvimento Sustentável - Brasil, Energia – Fontes alternativas.



## **ABSTRACT**

This dissertation analyses the development of the energy of Hydrogen in Brazil, guided by the perspective of paradigmatic change. In such a perspective, of sustainable development and green economy, a paradigm shift in the energy sector is required. Energy is fundamental for quality life and welfare improvement, however aiming at sustaining economic growth it is necessary a search for new renewable and cleaner sources of energy, alternative to fossil fuels. This search has been intensified all around the world and in such a context energy of Hydrogen has been as an alternative towards the promotion of an economy of low carbon emission. This work provides a broad picture of the energy of Hydrogen development worldwide. Identifies and analyses initiatives for the development of these technologies in Brazil. It points out, as conclusions, that energy from Hydrogen is not included in the Brazilian Government policies for the energy sector. Regarding strategic studies, it's stressed that important work has been done by the Brazilian Federal Government, especially by the Ministry of Science Technology and Innovation (MCTI), Ministry of Mining and Energy (MME) and the Centre for Strategic Studies (CGEE). Finally, advances main conclusions pointing out both that there is no lack of sources of energy supply in Brazil and that there are multiple options for energy supply when the issue is the "greening" of the energy matrix in the country. However, it is observed in the Brazilian energy planning a passive posture limited to concerns about energy security, risk of "blackout"; shy, so in exploring the huge energy potential that the country has, and what might have as a goal the transformation of Brazil in energy-exporting country. Energy of Hydrogen in Brazil is a strategic option that still remains in the level of strategic studies. That pattern is also observed at international level with few exceptions of commercial use. Energy of Hydrogen reveals to be the best technical option for clean energy production, however for its general use it is still required significant advances in its cost production cuts setting investment policies to cheaper equipment, creation of infrastructure for distribution and expansion of demand.

Key words: Sustainable Development – Brazil, Energy – Alternative source

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PODER CALORÍFICO DE DIFERENTES COMBUSTÍVEIS .....	73
TABELA 2 - PREÇOS ESTIMADOS PARA VIABILIDADE COMERCIAL DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL .....	84
TABELA 3 - COMPARATIVO DA OFERTA INTERNA DE ENERGIA PRIMÁRIA NO BRASIL ENTRE 2001 A 2010 .....	105

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - DETALHAMENTO PARA INVESTIMENTO MUNDIAL PROPOSTO PARA OS DEZ SETORES FUNDAMENTAIS PARA A “ECONOMIA VERDE” .....	41
QUADRO 2 - IMPACTOS DECORRENTES DOS EVENTOS EXTREMOS DO TEMPO, CLIMA E NÍVEL DO OCEANO .....	45
QUADRO 3 - EXEMPLOS SELECIONADOS DE TECNOLOGIAS E POLÍTICAS PARA MITIGAÇÃO SOCIAL.....	47
QUADRO 4 - OS PRINCIPAIS EMISSORES DE CARBONO E PRINCIPAIS INDICADORES.....	52
QUADRO 5 - COMPARATIVO DA INTENSIDADE DE CARBONO NA ECONOMIA GLOBAL ENTRE 1990 E 2007 .....	53
QUADRO 6 - CRONOLOGIA DAS NEGOCIAÇÕES SOBRE MUDANÇA DO CLIMA .....	54
QUADRO 7 - PRINCIPAIS FONTES PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA SUSTENTÁVEL.....	70
QUADRO 8 - OS PROCESSOS MAIS RELEVANTES NA PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO .....	77
QUADRO 9 - PRINCIPAIS INVESTIMENTOS EM USINAS HIDRELÉTRICAS NA REGIÃO AMAZÔNICA.....	104
QUADRO 10 - PROJETOS BRASILEIROS COM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL PARA GERAÇÃO ESTACIONÁRIA.....	116

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - OS MAIORES EMISSORES DE CARBONO NO MUNDO .....	50
GRÁFICO 2 - TAXA DE CRESCIMENTO MÉDIO DA EMISSÃO DE CARBONO 2001-2010 .....	51
GRÁFICO 3 - DEMANDA POR ENERGIA PRIMÁRIA E PIB ENTRE OS ANOS DE 1971 A 2007 .....	64
GRÁFICO 4 - OFERTA DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTE NO MUNDO - 2009.....	66
GRÁFICO 5 - NOVOS INVESTIMENTOS EM ENERGIA RENOVÁVEL NO MUNDO ENTRE 2004 E 2010 EM BILHÕES DE DÓLARES.....	68
GRÁFICO 6 - EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE HIDRELÉTRICA NO BRASIL 1975- 2020 .....	104
GRÁFICO 7 - ENERGIA RENOVÁVEL VS. ENERGIA NÃO RENOVÁVEL NO BRASIL ENTRE 2001 E 2020 .....	106
GRÁFICO 8 - OFERTA DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTE – A ESQUERDA BRASIL; E A DIREITA, O MUNDO .....	107

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Do lado esquerdo, sistema crescendo de forma autônoma e do lado direito sistema crescendo limitado pelos recursos naturais .....	28
Figura 2 - Economia como subsistema, à esquerda “mundo vazio”; e à direita, “mundo cheio” .....	31
Figura 3 - Curva de custo de abatimento de emissões .....	48
Figura 4 - Possíveis rotas para a produção e utilização do hidrogênio como vetor energético.....	74
Figura 5 - Economia e energia 2011-2020 .....	102
Figura 6 - Cadeia de suprimento do hidrogênio como vetor energético .....	113

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CaC	Célula a Combustível
CCJE	Centro de Ciências Jurídicas e Econômicas
CEMIG	Companhia Energética Minas Gerais
CENEH	Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio
CEPEL	Centro de Pesquisa em Energia Elétrica
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CMEPSP	Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
GEE	Gases do Efeito Estufa
GNV	Gás Natural Veicular
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IEA	International Energy Agency
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
IPHE	Internacional Partnership for the Hydrogen Economy
ISO	International Standards Organization
MCI	Motores de Combustão Interna
MCTI	Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação
MME	Ministério de Minas e Energia
MW	Megawatt
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONU	Organização das Nações Unidas
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PD&I	Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
PEM	Proton Exchange Membrane
PEMFC	Proton Exchange Fuel Cell
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PIB	Produto Interno Bruto
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
ProCaC	Programa Brasileiro Célula a Combustível
ProH <sub>2</sub>	Programa de Ciência Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio
Proinfa	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UNDP	United Nations Development Programme
UNEP	United Nations Environment Programme
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
US-DOE	Department of Energy of United States of America

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
 <b>CAPÍTULO 1 - DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E “ECONOMIA VERDE”: ASPECTOS TEÓRICO-CONCEITUAIS .....</b>	<b>22</b>
1.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: EVOLUÇÃO HISTÓRICO-CONCEITUAL .....	23
1.1.1 A “ecologização” da economia .....	25
1.1.2 O debate acerca do desenvolvimento sustentável .....	32
1.2 “ECONOMIA VERDE”: CONCEITO .....	38
1.2.1 Delineamentos de uma “economia verde” .....	39
1.2.2 Promoção da “economia verde” .....	43
1.2.3 As emissões de carbono no mundo .....	49
 <b>CAPÍTULO 2 - ENERGIA LIMPA E RENOVÁVEL; A PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO HIDROGÊNIO: CONCEITOS, ASPECTOS TÉCNICOS E PANORAMA INTERNACIONAL .....</b>	<b>60</b>
2.1 ENERGIA, ENERGIA LIMPA E RENOVÁVEL E MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL .....	61
2.1.1 Crescimento econômico e intensidade energética .....	62
2.1.2 A estrutura da oferta de energia no mundo .....	66
2.1.3 Energia limpa e renovável: oportunidade de desenvolvimento econômico sem emissão de carbono .....	68
2.2 PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO HIDROGÊNIO - SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS EXISTENTES E EM DESENVOLVIMENTO .....	72
2.2.1 Como obter o hidrogênio .....	75

2.2.2 Hidrogênio como fonte de geração de energia .....	78
2.2.3 Células a combustível de hidrogênio .....	80
2.2.4 Como armazenar e transportar o hidrogênio .....	88
2.2.5 Produção descentralizada de energia .....	91
2.3 ESFORÇOS INTERNACIONAIS RUMO À ECONOMIA DO HIDROGÊNIO .....	94
 <b>CAPÍTULO 3 ENERGIA DO HIDROGÊNIO: PANORAMA NO BRASIL ..</b>	<b>101</b>
 3.1 INICIATIVAS NACIONAIS RUMO À ECONOMIA DO HIDROGÊNIO .....	108
3.1.1 Programa brasileiro de sistemas célula a combustível .....	111
3.1.2 Roteiro para a estruturação da economia do hidrogênio .....	112
3.1.3 Incentivos à economia do hidrogênio .....	117
3.1.4 Incentivos para a produção do hidrogênio no Brasil .....	121
3.1.5 O desenvolvendo do transporte e do armazenamento do hidrogênio no Brasil .....	124
3.2 O DESENVOLVIMENTO DA ENERGIA DO HIDROGÊNIO NO BRASIL: CONCLUSÕES PRELIMINARES .....	128
 <b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>134</b>
 <b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>138</b>



## INTRODUÇÃO

A presente dissertação foca o desenvolvimento da energia do hidrogênio no Brasil, buscando analisar os principais avanços e obstáculos objetivando contribuir para a generalização de seu uso como fonte de energia limpa e renovável no Brasil.

Este trabalho insere-se no contexto dos debates internacionais do setor energético, quais sejam: segurança energética; combate as alterações climáticas; redução da poluição e riscos à saúde; e na inclusão de milhões de pessoas ao acesso à energia<sup>1</sup>. Neste sentido, a utilização do hidrogênio como vetor energético está sendo analisada em todo o mundo e neste trabalho como uma fonte de energia limpa e renovável capaz de enfrentar os desafios deste setor, tornando-se uma alternativa viável aos combustíveis fósseis.

O processo de produção do hidrogênio pode se desenvolver a partir de diversos métodos, podendo inclusive utilizar diferentes insumos, assim a sua obtenção pode privilegiar as potencialidades locais, garantindo o acesso à energia a milhões de pessoas no mundo, além de poder contribuir para garantir o fornecimento de energia após o declínio da produção de petróleo. Do ponto de vista dos impactos ambientais, a utilização do hidrogênio como vetor energético emite somente água como subproduto, o que torna a sua utilização bastante recomendada. O hidrogênio pode ainda ser utilizado em diferentes aplicações como: estacionária, veicular e portátil, configurando assim, a versatilidade desta solução energética para os diferentes mercados.

As principais questões conceituais a este debate são energia limpa e renovável; “economia verde”; e sustentabilidade do desenvolvimento. No setor energético, o Brasil é identificado como o país que apresenta muitas opções para o desenvolvimento de sua matriz energética e que enfrenta o desafio de definição das estratégias principais numa política energética nacional. Assim, este trabalho busca identificar e discutir as iniciativas no Brasil para o desenvolvimento da energia do hidrogênio, numa perspectiva de “economia verde”, produção de baixo carbono e desenvolvimento sustentável, portanto, o objetivo desta dissertação, que insere-se no atual debate do setor energético brasileiro.

---

<sup>1</sup> (UNEP, 2011a)

Historicamente, o processo de crescimento econômico mundial deu-se num contexto de crença de que os recursos naturais são inesgotáveis, porém ao mesmo tempo em que se aumentava a produção, também se elevava os níveis de poluição. Neste contexto, o processo de crescimento sem maiores preocupações com o meio ambiente foi gradativamente sendo revisto a partir da década de 1960, quando começou a ganhar importância às pressões e debates sobre os impactos ambientais do crescimento econômico, que teve início, de forma sistêmica na sociedade americana (EUA). Então o foco das atenções se volta para as ações antrópicas capazes de modificar o meio ambiente e como se pode evitá-las ou mitigá-las.

Na ciência econômica clássica, através do mecanismo já consagrado de oferta e demanda, à medida que o recurso se esgota, ou seja, a oferta diminui, seu preço tende a se elevar, a aplicação desse mecanismo manteria um controle entre a oferta e a demanda por recursos, assim quando o preço se elevar, a procura diminuiria, porém foi constatado que esse mecanismo associado ao meio ambiente não funciona adequadamente.

Uma importante interpretação da ineficiência deste mecanismo é a de que o meio ambiente não é em geral objeto de direito de propriedade definido, ou seja, a propriedade é de todos. Assim sendo, não há também mercados definidos. Poluição e degradação ambiental passam, então a serem entendidos como resultantes de “falhas de mercado”. Como externalidades negativas<sup>2</sup> resultantes das atividades econômicas privadas sobre bens coletivos ou comuns.

Segundo a conclusão do Dr. Warter E. Block em sua obra *Environmental problems, private property rights solutions* “o negócio de todos é o negocio de ninguém”. Neste caso, se nada for feito para a redução das emissões dos gases causadores do efeito estufa existe a possibilidade de que a interferência do homem na natureza possa mudar o clima no planeta.

Um dos principais gases causadores do efeito estufa é o dióxido de carbono, sua liberação para a atmosfera está intimamente ligada com o consumo de energia para a atividade econômica, visto que as principais fontes para geração de energia no

---

<sup>2</sup> Externalidade negativa é quando um agente econômico na busca de seus interesses privados (lucro, diversão, entre outros) causa danos a outros agentes, ou seja, causa danos a coletividade, por exemplo, a poluição do ar, em que uma indústria na busca por lucro polui o ar, causando danos respiratórios a população no seu entorno (SILVEIRA, 2006)

mundo provêm dos combustíveis fósseis (petróleo e carvão). De fato, existe uma correlação positiva entre crescimento econômico e demanda por energia. Segundo a *International Energy Agency* (2010) entre os anos de 2000 a 2007, para cada 1% de crescimento do Produto Interno Bruto – PIB houve um aumento de 0,7% da demanda primária de energia. Como grande parte das emissões dos gases que provocam o efeito estufa provém desta demanda mundial por energia<sup>3</sup>, pode-se afirmar que houve um aumento da emissão desses gases na atmosfera.

Se já não bastasse a forte relação entre crescimento e emissão dos GEE, este processo de crescimento econômico até o momento excluiu grande parcela da população mundial dos bens e serviços produzidos. A população marginalizada nesse processo almeja um grau de desenvolvimento que significa num aumento da demanda por energia, o que pode provocar um aumento ainda maior das emissões dos GEE. A resposta para essa questão é aliar um modelo de crescimento econômico a uma mudança das suas bases tecnológicas, sociais, políticas, econômicas, geográficas e culturais permitindo assim, um crescimento da economia de forma sustentável com melhoria da qualidade de vida. Desta forma, o modelo apresentado pela Organização das Nações Unidas - ONU foi o de desenvolvimento sustentável, que trata de um processo de transformação no qual a exploração dos recursos, a direção dos investimentos, a orientação do desenvolvimento tecnológico e as mudanças institucionais e culturais se harmonizam e reforçam o potencial presente e futuro, a fim de atender às necessidades e aspirações humanas por muitos anos.

Porém, para se chegar a um desenvolvimento sustentável é preciso trilhar caminhos que levem até este objetivo, assim a introdução de uma “economia verde” é uma alternativa que pode ser seguida pelos países. A “economia verde” pode ser entendida como “aquela que resulta na melhoria do bem estar humano e na igualdade social, ao mesmo tempo em que reduz significativamente os riscos ambientais e a escassez ecológica”. Esta se baseia em três estratégias: redução das emissões de carbono; maior eficiência energética e no uso de recursos; e na prevenção da perda da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos.

O processo de transição para uma “economia verde” com redução da emissão de carbono vem sendo realçada como um desafio para os mais diversos níveis de

---

<sup>3</sup> 70% das emissões dos GEE de origem antrópica são oriundas do setor energético (IEA, 2011).

sociedade e trazendo implicações em diversas atividades econômicas. Desta forma, há uma exigência para que se desenvolvam soluções de ciência, tecnologia e inovação capazes de substituir de forma eficiente às alternativas energéticas baseadas nos combustíveis fósseis.

Neste sentido a busca por fontes de energia alternativa que por sua vez libera menos poluição renova-se em importância. Assim a energia do hidrogênio se destaca como um dos mais promissores vetores energéticos do século 21. Primeiro porque não emite nenhum gás causador do efeito estufa; segundo, o hidrogênio se encontra distribuído em quase toda a superfície terrestre, através de organismos biológicos e da água, podendo ser produzidos de várias formas diferentes, e; terceiro, pelo fato da geração distribuída ter o poder de inclusão de várias pessoas que não possuem acesso à energia elétrica, que de acordo com o relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA chega a 1,4 bilhão de pessoas. Assim, a utilização do hidrogênio como vetor energético se alinha ao conceito de desenvolvimento sustentável e de “economia verde”.

O Brasil está buscando desenvolver esta cadeia para a utilização do hidrogênio, para isso está participando de uma Parceria Internacional para a Economia do Hidrogênio – IPHE desde 2003. Porém, para que o hidrogênio se torne uma importante fonte de geração de energia no país, é preciso desenvolver uma infraestrutura baseada neste combustível, para isso deverão ser superadas barreiras técnicas, econômicas e institucionais, cujos esforços e investimentos tendem a ser elevados, já que seria necessária a adequação de toda a cadeia de suprimento já desenvolvida baseada nos combustíveis fósseis.

A prospecção do panorama internacional de desenvolvimento da energia do hidrogênio foi efetuada através de pesquisa em documentos técnicos desenvolvidos pelo governo brasileiro, de documentos da IPHE e consultas ao site do Instituto Internacional de energia (IEA). Para o caso brasileiro este estudo baseou-se em estudos estratégicos para o desenvolvimento no âmbito do governo federal brasileiro, através dos Ministérios Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI e de Minas e Energia – MME que elaboraram o “Programa Brasileiro de Células a Combustível, 2002” e o “Roteiro para Estruturação da Economia do Hidrogênio, 2005” respectivamente. Estes documentos governamentais estabelecem diretrizes para desenvolvimento tecnológico, econômico e institucional para a cadeia produtiva do

hidrogênio. Além destes, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, lançou em 2010 um documento intitulado “Hidrogênio Energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025” que procura fornecer subsídios aos tomadores de decisão, bem como identificar os gargalos encontrados para a promoção da economia do hidrogênio.

Neste contexto, a presente dissertação – *Energia do hidrogênio: mudanças paradigmáticas rumo a uma “economia verde”* – se propôs a discutir a importância do hidrogênio como vetor energético para a promoção do desenvolvimento sustentável na busca de promoção de uma “economia verde” de baixa emissão de carbono, identificando as iniciativas brasileiras e mundiais para a sua promoção.

Esta dissertação encontra-se dividida em três capítulos. No Capítulo 1 – Desenvolvimento sustentável e “economia verde”: aspectos teórico-conceituais – são explicitados os conceitos basilares ao desenvolvimento do trabalho, quais sejam: desenvolvimento sustentável (conceituação e evolução histórica) e Economia Verde, como abordagem recente que se refere ao modelo econômico requerido para a promoção da sustentabilidade do desenvolvimento.

O segundo capítulo – Energia limpa e renovável; a produção de energia a partir do hidrogênio: conceitos, aspectos técnicos e panorama internacional– destina-se a apresentar a relação histórica existente entre crescimento econômico e demanda primária de energia; os conceitos de energia limpa e renovável, e aspectos técnicos da produção de energia do hidrogênio, enquanto fonte de energia limpa e renovável a partir do hidrogênio, bem como um panorama dos esforços internacionais para o desenvolvimento da energia do hidrogênio, como vetor energético.

O capítulo 3 – Energia do hidrogênio: panorama no Brasil – analisa o panorama para a utilização do hidrogênio no país. Resgata a partir de documentos governamentais os esforços brasileiros para a promoção da energia do hidrogênio. Situa tais esforços no grande debate energético nacional, que se assenta nas preocupações de garantia de suprimento de energia elétrica para dar suporte a uma economia em crescimento, por um lado, e a crescente pressão e exigências de compromissos acordados internacionalmente de promover a redução nas emissões de carbono na economia brasileira, ou em outras palavras o compromisso de promoção do “esverdeamento” da matriz energética brasileira, por outro.

Finalizando as principais conclusões apresentadas.

## **CAPÍTULO 1**

### **DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E “ECONOMIA VERDE”: ASPECTOS TEÓRICO-CONCEITUAIS**

O desenvolvimento da sociedade na atualidade está cada vez mais focado na relação entre desenvolvimento e meio ambiente. Se por uma lado é preciso manter um ritmo de crescimento para melhorar a qualidade de vida de toda a população, por outro esta mesma qualidade de vida fica prejudicada por este crescimento. Assim, é preciso enxergar o mundo por outras lentes, isto requer a definição de novos parâmetros, formas e padrões para a promoção do crescimento econômico e da qualidade de vida em simultâneo, ou seja, para a promoção do desenvolvimento sustentável.

Diferentemente da tradicional idéia de crescimento econômico ilimitado, no qual a natureza era elemento constitutivo do sistema econômico, conforme propugnado por Boulding (1969) robustece-se na sociedade a necessidade de mudança conceitual no sentido de identificar o planeta Terra como sistema limitado e vivo com ciclos próprios no qual o sistema econômico se insere e com ele tem que interagir.

Neste sentido, a natureza atua não apenas como receptora dos resíduos e como fornecedora das matérias primas, mas principalmente para a manutenção da vida. Neste cenário descrito por Merico (2002 p. 21), a biosfera vem demonstrando fortes sinais de esgotamento e algumas alterações que foram impostas por este processo econômico podem ser irreversíveis, outras podem ser de difíceis ou custosas reversões.

A abordagem desta temática tem por objetivo contextualizar o debate travado rumo ao desenvolvimento que seja capaz de reduzir as externalidades negativas geradas para o meio ambiente. Desta forma, será analisada a histórica indiferença da ciência econômica em relação à questão ambiental e após a década de 1960, uma gradual, porém progressiva revisão dos pressupostos teóricos e metodológicos das abordagens convencionais rumo à uma “economia verde”.

De fato, durante as últimas décadas houve um crescimento da atividade econômica em nosso planeta e as consequências advindas deste crescimento evidenciam a

contribuição da natureza no processo produtivo. E diante da progressiva escassez de recursos naturais, o que antes era considerado serviço gratuito pela natureza, está cada vez mais associado a custos.

Neste capítulo explicita-se o referencial teórico-conceitual adotado neste trabalho com foco nos conceitos de desenvolvimento sustentável e “economia verde”.

## 1.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: EVOLUÇÃO HISTÓRICO-CONCEITUAL

O debate sobre a relação economia e meio ambiente ganha importância a partir da década de 1960, nos meios políticos, sociais e acadêmicos principalmente sobre os danos ambientais provocados pelo crescimento econômico. Desta forma, as temáticas de energia, recurso natural e meio ambiente se transformaram em temas de importância tanto econômica, quanto política e social.

Para a análise deste período será utilizada a abordagem de Dalcomuni (1997, p.18; 2006, p. 49-56), por se adequar na construção dos argumentos deste trabalho. Assim, foi identificado um consenso na literatura econômica em classificar quatro períodos entre “vales e cumes” de conscientização ambiental: anterior à década de 1960, da década de 1960 até o início de 1970, início da década de 1970 até meados de 1980, e de meados de 1980 até hoje.

Quando se analisa o período anterior a 1960, verifica-se que as atenções das ciências econômicas estão concentradas no crescimento econômico, com um pequeno ou inexistente debate sobre questões relacionadas ao meio ambiente. Segundo Dalcomuni (1997, p. 18), a abordagem econômica deste debate foi desenvolvida sem a devida relevância até a década de 1960<sup>4</sup>. Assim, os esforços eram no sentido de desenvolver uma teoria do crescimento para alcançar e sustentar o crescimento econômico. Desta forma, o crescimento conduziu uma rápida expansão industrial sem que fosse suscitado o debate acerca do seu impacto

---

<sup>4</sup> Embora nesta época a produção a respeito deste tema tenha sido muito pequena, houve alguns trabalhos que serviram mais tarde para o desenvolvimento desta temática como Arthur Pigou (1920) que desenvolveu uma teoria que serve para lidar com a escassez de recursos naturais, colocando os interesses de dois grupos distintos: os que querem explorar e os que querem preservar para desfrutar dos benefícios do ambiente natural. O economista Harold Hotelling (1930) desenvolveu uma teoria da utilização ideal dos recursos naturais, baseado no equilíbrio entre as necessidades presentes e as necessidades futuras (DALCOMUNI, 1997, p. 23-25).



sobre o meio ambiente, principalmente na década de 1950.

Esse crescimento acelerado da década de 1950 suscitou a partir da década seguinte um aumento da sensibilidade da sociedade a respeito da externalidade negativa do crescimento industrial sobre o meio ambiente. Neste momento houve uma demanda significativa e sem precedentes de demanda por regulação ambiental. Para ter uma idéia, a atividade reguladora do Governo dos Estados Unidos nesta época situou-se em um nível historicamente elevado (ROTHWELL, 1992, apud DALCOMUNI, 1997, P.18).

Da década de 1960 até o início da década posterior observa-se o início de uma intensa onda para as questões ambientais culminando com o relatório do Clube de Roma intitulado “Limites ao Crescimento”, que através de sofisticados modelos quantitativos argumentou que a pressão sobre os recursos naturais e energéticos limitaria o crescimento econômico, mesmo incluindo o progresso tecnológico na análise.

Os choques do petróleo da década de 1970 resultaram em uma redução do crescimento econômico e também das preocupações ambientais, neste período a preocupação na sociedade volta a focar na viabilização da geração do emprego e da renda nas economias mais afetadas pela crise. Com a superação da crise do petróleo em meados da década de 1980 e a retomada do crescimento, ressurgiu a conscientização ambiental que perdura até hoje.

No mesmo período houve a legitimação do desenvolvimento sustentável como um conceito formal e sistematizado através do Relatório de Brundtland<sup>5</sup>, sendo este elaborado pela Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento<sup>6</sup>, intitulado “Nosso Futuro Comum” no ano de 1987 (DALCOMUNI, 1997, p. 20). Segundo o relatório, o conceito de desenvolvimento sustentável significa “atender às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das gerações futuras atenderem as suas próprias necessidades”, que passa ser entendido como um conceito estrito de desenvolvimento sustentável sendo sustentado por três pilares:

---

<sup>5</sup> Com a missão de conciliar a questão ambiental e o desenvolvimento econômico, sua proposta destaca, dentre outras medidas, que os governos devem adotar uma estratégia para diminuir o consumo de energia promovendo o desenvolvimento de tecnologias de uso de fontes energéticas renováveis.

<sup>6</sup> Esta comissão foi criada pela Organização das Nações Unidas (ONU) com o objetivo de reexaminar as questões críticas relativas ao meio ambiente e propor novas formas de cooperação internacional nessa área.

sustentabilidade ambiental, sustentabilidade econômica e sustentabilidade social.

Para se construir esse conceito de desenvolvimento sustentável foi necessário incluir primeiro o debate acerca da economia e dos recursos naturais. Assim a próxima seção irá contribuir para sistematizar os problemas ambientais com os econômicos que consolidou o processo de “ecologização” da economia.

### 1.1.1 A “ecologização” da economia

O processo de “ecologização” da economia, pelo menos nos termos teórico-metodológicos, foi iniciado por vários trabalhos que impactaram os meios acadêmicos e os ambientalistas da época. Estes trabalhos tiveram como ícones os autores Kennedy Boulding (1910-1993), Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994) e Herman Daly (1938-). Entre as principais teses destacam-se a “*Economics of coming spaceship Earth*”, “*Entropy law and the economics process*” e “*Steady state*”. Desta forma, havia uma busca para dar um caráter científico às pesquisas nessa área.

Os trabalhos de Boulding (1966) contribuíram para a criação de uma teoria geral dos sistemas, mostrando que a natureza é a base material que sustenta todo o processo. Na obra “*The Economics of Coming Spaceship Earth*” (1966), o autor afirma que ao longo da história do homem, sempre existiu algum lugar além dos limites conhecidos, assim os homens poderiam degradar o ambiente natural e após essa degradação migrarem para outras regiões. Porém, a Terra é um sistema fechado e como tal não comporta a atividade nômade, desta forma, se o homem degradar a Terra, ele não poderá simplesmente migrar para outro planeta na busca de mais recursos, porque não existirá outra “Terra” para a humanidade.

Boulding (1966) com o intuito de ilustrar como funcionaria essa economia, comparou a Terra com uma nave espacial, dando a entender que o nosso planeta Terra tem uma capacidade limitada com relação aos recursos naturais e também na absorção dos resíduos. Com relação a este assunto o autor destaca:

*Economists in particular, for the most part, have failed to come to grips with the ultimate consequences of the transition from the open to the closed earth. One hesitates to use the terms "open" and "closed" in this connection, as they have been used with so many different shades of meaning. Nevertheless, it is hard to find equivalents (BOULDING, 1966, p. 3).*

Neste mesmo sentido complementa Merico (2002, p. 21):

Tanto como receptora de resíduos como fonte de materiais e energia, a biosfera vem demonstrando fortes sinais de seus limites. Algumas alterações impostas pelo processo econômico parecem irreversíveis, outras, muito difíceis ou custosas de reverter. O que antes era considerado serviço proporcionado gratuitamente pela natureza, tem aparecido fortemente associado a custos.

Assim, quando se entende que a Terra é um sistema fechado<sup>7</sup>, os princípios econômicos devem se ajustar a essa nova idéia, que são diferentes do sistema aberto. No sistema aberto o objetivo principal é o consumo e a produção, e o sucesso medido por uma taxa que indica a transferência dos fatores de produção. Já no sistema fechado, os recursos naturais são limitados, tanto para a extração quanto para a absorção de poluição, desta forma, tem que existir um sistema cíclico ecológico capaz de garantir energia e bens continuamente.

A primeira e a segunda Leis da Termodinâmica afirmam que “o conteúdo total de energia no Universo é constante, e a entropia está aumentando”. A primeira é chamada de “Lei da conservação”, que estabelece que a energia não pode ser criada nem destruída<sup>8</sup>. A segunda Lei da Termodinâmica afirma que embora a energia não possa ser criada ou destruída, ela pode ser transformada.

Contudo, essa transformação segue sempre o mesmo sentido de disponível para a indisponível. Por exemplo, quando um carvão é queimado, sua energia é convertida em dezenas de gases que se espalham na atmosfera, este processo não criou, nem destruiu a energia, apenas a modificou, também não é possível reverter o processo, a energia útil contida no carvão se modifica para uma forma de energia mais entrópica. Este processo faz com que haja perda de energia disponível para realizar um trabalho útil. Assim a perda de energia útil é chamada de entropia (Rifkin, 2003, pp. 43-44).

No mesmo sentido Merico (2002, p. 41) escreve:

Tradicionalmente ocupada com o fluxo monetário e o crescimento econômico, a análise econômica negligencia o pressuposto básico de que a biosfera é finita e que a economia deve ajustar-se aos limites do ambiente natural; negligencia o papel do capital natural na economia, e finalmente, negligencia as mudanças qualitativas no estado da matéria, ou seja, os fluxos energéticos (estas intrínsecas ao processo econômico).

A reversão da entropia é possível, porém para que isso ocorra é necessário

<sup>7</sup> Existem três tipos de sistemas termodinâmicos: os abertos, os fechados e os isolados. Os sistemas abertos trocam energia e matéria; o fechado troca energia, mas não troca matéria e os isolados que não trocam energia nem matéria (Rifkin, 2003, p. 45).

<sup>8</sup> Isto quer dizer que a quantidade de energia existente no Universo está fixada desde o início dos tempos (Rifkin, 2003, p. 44).

adicionar energia neste processo, e desta forma haverá um aumento da entropia geral do sistema. Por exemplo, a reciclagem do lixo gera gastos adicionais de energia na coleta, no transporte e no processamento dos materiais usados, aumentando desta forma a entropia geral do ambiente (RIFKIN, 2003, p. 45).

Nesta análise quanto à importância das Leis da Termodinâmica, o químico inglês Frederick Soddy observa que estas leis.

Controlam em última instância, a ascensão e a queda dos sistemas políticos, a liberdade ou a servidão das nações, os movimentos do comércio e da indústria, as origens da riqueza e da pobreza e do bem estar físico da espécie como um todo (RIFKIN, 2003, p. 46).

Boulding (1966) aplicou a termodinâmica para a análise do uso do ambiente natural, concluindo que todo o consumo gera a mesma quantidade de resíduo, porém em outras formas. E pela Segunda Lei da Termodinâmica, a Lei da Entropia, que estabelece que a matéria já utilizada na produção de bens é cada vez mais dissipada, o que torna impossível a reconversão por completo a sua forma original. Este fenômeno se deve ao processo de transformação que sempre produz calor e tem a tendência de se dissipar. Neste sentido “a energia total do universo permanece constante e a entropia do universo continuamente tende ao máximo” (MERICO, 2002, p. 41).

Georgescu-Roegen (1986) publicou uma coletânea intitulada *Analytical Economics* a partir de artigos científicos sobre a teoria do consumidor, demonstrando que a abordagem tradicional da produção viola as leis da termodinâmica.

Antes desta publicação, em 1971, Georgescu-Roegen publicou sua obra intitulada “*The Entropy Law and Economic Process*”, demonstrando a relação entre as ciências físicas e econômicas, aplicando os aspectos termodinâmicos nos processos econômicos. O autor introduziu a idéia de irreversibilidade e limites na teoria econômica, levando em consideração a Lei da Entropia (GEORGESCU-ROEGEN, THE ENTROPY LAW AND THE ECONOMIC PROCESS, 1999).

Essa tese se opõe ao modelo neoclássico, que resume “o meio ambiente como uma alocação intertemporal de recursos entre o consumo e o investimento” e se utiliza do conceito de que os “agentes econômicos são dotados de racionalidade substantiva e que objetivam maximizar sua utilidade”. De acordo com a análise neoclássica, “os recursos ambientais não representam um limite absoluto a expansão da economia no longo prazo”.

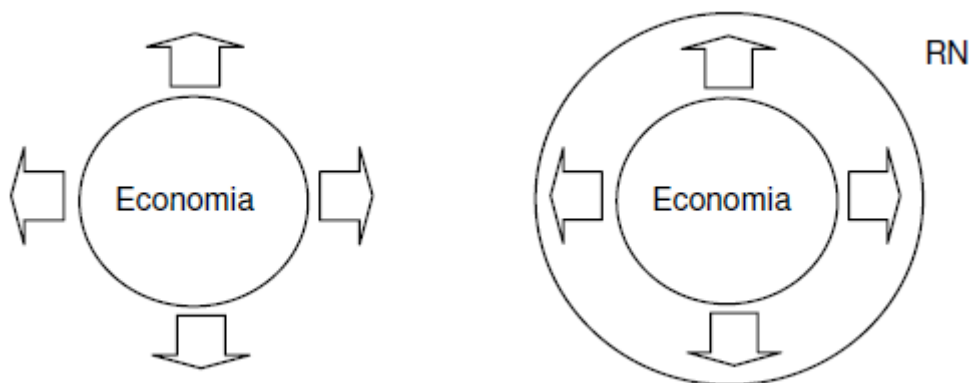


Figura 1 - Do lado esquerdo, sistema crescendo de forma autônoma e do lado direito sistema crescendo limitado pelos recursos naturais.

Fonte: ROMEIRO, 2003, p. 8.

Para dar respostas a essas questões, a teoria neoclássica se pautou em dois argumentos. O primeiro afirma que devido à escassez de recursos ambientais, haveria uma indução para que as inovações tecnológicas superassem essas restrições, desta forma no longo prazo se garantiria a expansão econômica. O segundo argumento, considera que a externalidade causada pelo dano ambiental deve ser internalizada na empresa causadora do dano ambiental. Com estes argumentos a teoria neoclássica inverteu a lógica da agenda ambiental, porque desta forma, os critérios econômicos que seriam responsáveis por orientar a utilização dos recursos ambientais através da valoração ambiental, e não os critérios científico-ambientais.

Esta é a mesma lógica utilizada pelos economistas clássicos como Adam Smith (1723-1790) e Jean-Baptiste Say (1767-1832)<sup>9</sup> para os mercados de bens e serviços. Se forem utilizados os mesmos mecanismos de ajuste dos preços propostos para o mercado de recursos naturais, isso faria com que devido à escassez desses recursos, haveria uma elevação de preços, que incentivaria o uso de novas tecnologias por parte dos fornecedores, e a economia desta forma entraria

<sup>9</sup>Esses autores associaram o ambiente de mercado a um mecanismo no qual a oferta e demanda se regulam constantemente e reciprocamente.

em equilíbrio. (Rifkin, 2003, p. 52)

Partindo do pressuposto de que o único fator limitante do progresso econômico é a natureza e o planeta é finito e materialmente fechado Georgescu-Roegen concluiu que a economia não pode crescer indefinidamente ou mesmo pode manter seu tamanho.

O mesmo autor faz uma diferença entre duas fontes de entropia que são acessíveis ao homem: a primeira é o estoque de matéria e energia dos depósitos minerais e o segundo é o fluxo de radiação solar. Se for levado em consideração que os estoques terrestres de baixa entropia são limitados, na visão do autor a captação dos fluxos de radiação solar é uma alternativa para a disponibilidade de energia na sociedade. Desta forma, os baixos estoques na Terra destas fontes minerais fará com que a humanidade concentre esforços para fazer um melhor uso da energia solar.

Na conclusão de Georgescu-Roegen a entropia dos processos é inflexível, porque o próprio crescimento econômico deteriora suas bases físicas, e desta forma não pode ser mantida de forma sustentável. Assim o melhor que se pode fazer é retardar o processo, utilizando forma mais racional os recursos naturais<sup>10</sup>.

Para sua análise, Daly (1974, p. 15) resgatou a idéia de “*stationary state*” de John Stuart Mill<sup>11</sup> e adotou o termo “*steady state*”<sup>12</sup>. Este termo pode ser entendido como a “situação em que a quantidade de recursos da natureza utilizada seria suficiente apenas para manter constante o capital e a população, e os recursos primários só seriam usados para melhorar qualitativamente os bens de capital” (Feitosa, 2010, p. 31).

*A steady-state economy is defined by constant stocks of physical wealth (artifacts) and a constant population, each maintained at some chosen, desirable level by a low rate of throughput-i.e., by low birth rates equal to low death rates and by low physical production rates equal to low physical depreciation rates, so that longevity of people and durability of physical stocks are high (DALY, 1974, p. 15).*

<sup>10</sup> O autor afirma que o processo econômico como se conhece hoje será decrescente em consequência da limitação material da Terra, assim ele propõe que este processo fosse iniciado voluntariamente, ao invés de esperar que os recursos naturais fiquem escassos. Assim, quanto mais cedo este processo se iniciar, maiores serão as possibilidades de sobrevivência da espécie humana (Veiga, 2009, pp. 64-65).

<sup>11</sup> Nesta idéia o capital e o trabalho tenderiam a parar de crescer e se manteriam constantes.

<sup>12</sup> Daly não utilizou o termo “*stationary state*” porque os neoclássicos o redefiniram como sendo o estado em que a tecnologia e as preferências são constantes, e que o capital e a população continuariam crescendo (Feitosa, 2010, p. 31).

Se for analisado que o custo de manter os estoques tem seu início a partir do momento em que há a extração dos recursos de baixa entropia (recursos naturais) e termina com a mesma quantidade de resíduos com alta entropia (poluição), o fluxo de *throughput* é o custo de manter os estoques de pessoas e riquezas físicas (artefato). Como se trata de custos, estes devem ser minimizados com a adoção de um nível de estoque desejado (FEITOSA, 2010, p. 32).

Os serviços que são gerados pelas ações das riquezas físicas e das pessoas atuam para beneficiar a atividade econômica. Já o estoque de riqueza física trata-se de um fluxo acumulado de rendimento (*throughput*) que como visto também se trata de um custo (FEITOSA, 2010, p. 32). A equação é expressa a seguir:

$$Eficiência\ Final = \frac{(01)\quad Serviço}{Throughput} = \frac{(02)\quad Serviço}{Estoque} \times \frac{(03)\quad Estoque}{Throughput}$$

Segundo Daly (1974, p.15), a Eficiência Final é “[...] *the ratio of service to throughput. But to yield a service, the throughput flow must be first accumulated into stocks even if of short duration*”, assim o Progresso do estado de equilíbrio consiste em aumentar a eficiência final, que pode ser feita de duas formas: pela manutenção do estoque de rendimento *throughput* (eficiência de manutenção) ou aumentando o serviço por unidade de tempo, dado o mesmo estoque (eficiência dos serviços).

Desta forma, a economia do estado estacionário é um subsistema do planeta que cresce nas suas dimensões físicas, assimilando uma quantidade cada vez maior de energia do ecossistema. Assim, se converte o espaço destinado para a expansão da população em um espaço econômico. Como consequência disso, o sistema deve se adaptar ao padrão de “Desenvolvimento sem crescimento” (DALY, 1993 p.813).

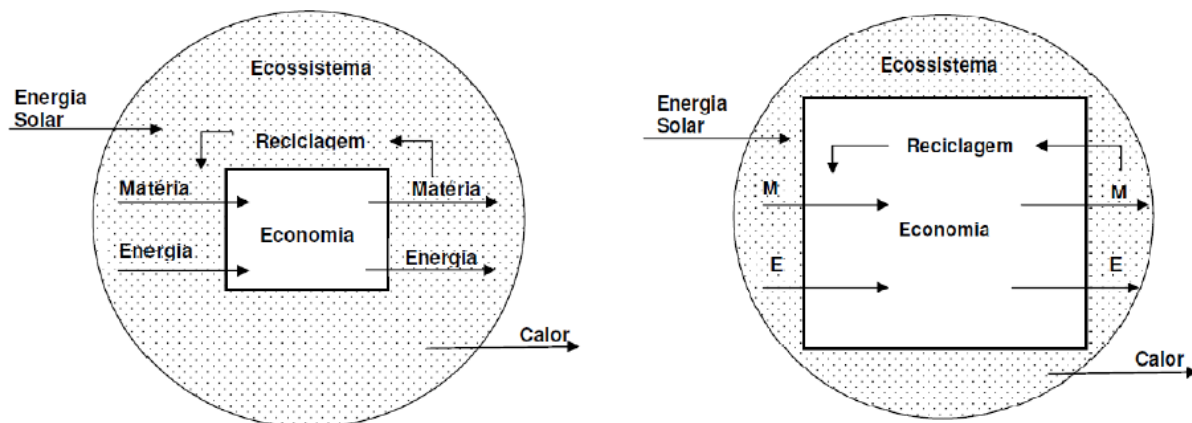


Figura 2 - Economia como subsistema, à esquerda “mundo vazio” e à direita “mundo cheio”.

Fonte: DALY, 1993

Esta interpretação de Daly de que a manutenção dos estoques constantes de riqueza física e o tamanho da população enfoca outro ponto importante de análise econômica que é a questão da escala (Veiga, 2009, p. 66). Assim foi inserido o conceito de escala nos mecanismos de alocação e distribuição, que são aceitos pela economia tradicional. Nesta ótica, uma escala sustentável garante que a capacidade de suporte se mantenha constante, desde que haja adaptações gradativas e inovações tecnológicas que garantam isso (MAY, 1996, p.56).

Toda análise *stricto sensu* feita até aqui com base nas leis da entropia pressupõe do ponto de vista físico, que toda forma de crescimento seja insustentável. Por esse motivo que para entender o conceito de sustentabilidade se faz necessário incluir neste debate outras dimensões, exigindo um processo de aprofundamento do processo de constituição do conceito. Assim recorremos a Freeman e Soete (1997, p. 414) por reconhecerem que alguma redução de recursos e algum dano ao meio ambiente são inevitáveis. Porém a questão é restringir essa redução por meio da reciclagem de materiais e os danos através de políticas contenciosas ou compensatórias.

Neste debate as tecnologias de produção e consumo devem ser capazes de satisfazer dois critérios: Primeiro eliminar ou reduzir os resíduos não recicláveis que causam dano ao meio ambiente, e não somente trocar o lugar de ocorrência<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Por exemplo, a substituição dos lançamentos de resíduos no rio, por depósitos nos aterros sanitários (Freeman & Soete, 1997, p. 413).



Segundo é que essas tecnologias sejam capazes de utilizar cada vez mais de recursos renováveis ou que se descubram substitutos para os não renováveis (FREEMAN & SOETE, 1997, p. 414).

A economia capitalista baseava-se na crença de crescimento econômico ilimitado e como foi verificada neste trabalho até o momento, esta forma de crescimento possui uma tendência insustentável, porém não se pode afirmar que toda forma de crescimento também seja insustentável. Em busca de uma forma de crescimento econômico capaz de suprir as necessidades humanas presentes e futuras, por um lado, e preservar o ecossistema natural, por outro, foi-se construindo, após intenso debate, o conceito de desenvolvimento sustentável.

### **1.1.2 O debate acerca do desenvolvimento sustentável**

O marco histórico que deu origem ao grande debate acerca do desenvolvimento sustentável ocorreu em 1972 com a publicação de um relatório do Clube de Roma intitulado “Limites ao Crescimento”, que através de sofisticados modelos quantitativos, argumentou “o limite do progresso econômico, devido à pressão sobre os recursos naturais e energéticos, mesmo que nesta análise fossem considerados avanços tecnológicos” (MEADOWS, 1972 apud DALCOMUNI, 1997, p. 18).

Esse relatório cristalizou todo o debate ambiental daquele momento e fez com que esta temática entrasse definitivamente na agenda de pesquisa dos economistas. O relatório previa que o “principal problema limitador do crescimento econômico mundial seria o esgotamento dos recursos não renováveis” <sup>14</sup>. Através de sofisticados modelos qualitativos, o relatório argumentava que, caso o crescimento verificado pelos Estados Unidos entre os anos 1922 a 1972<sup>15</sup> fosse generalizado para o resto dos países do mundo, este resultaria tanto em insuficiência de recursos naturais como de insumo. Isto se deve a impossibilidade do planeta absorver os impactos poluentes gerados por esta produção e consumo ampliados (DALCOMUNI, 1997, p. 18). De fato, o padrão de consumo norte americano é muito elevado. Assim os Estados Unidos no ano de 2011 possuía apenas 5% da população mundial, consumia 25% de toda a energia primária produzida no mundo e emitia 36% de todo

---

<sup>14</sup> No caso foram descritos os combustíveis fósseis e os metais

<sup>15</sup> Cabe lembrar que o relatório foi publicado em 1972, portanto trata-se do crescimento verificado pela economia americana a partir da década de 1920.

dióxido de carbono. Se toda a população mundial tivesse um nível de consumo igual a este, o planeta suportaria uma população máxima de 1,5 bilhão de pessoas (PORTAL G1, 2012).

Para se analisar o tamanho do desafio enfrentado hoje em dia, a estimativa é que em 2011 a população mundial estava próxima de sete bilhões e o consumo de recursos naturais já estava 25% maior do que a capacidade do planeta em se regenerar, assim o aumento da população mundial e do poder de consumo nos países em desenvolvimento, poderá acarretar maiores pressões ao meio ambiente (PORTAL G1, 2012).

Devido à repercussão do relatório, ainda em 1972 foi realizada a Conferência das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento e Meio Ambiente Humano, que ficou conhecida como Conferência de Estocolmo. Este foi o primeiro grande encontro para a discussão dos problemas ambientais, colocando a sustentabilidade ambiental no centro das atenções das negociações globais.

A economia tradicional, identificando a questão ambiental como externalidade começou a ser revista, assim foi sendo incorporado gradativamente nas funções clássicas o ambiente natural. Segundo Binswanger (2002) a própria função de produção que era entendida como uma combinação entre capital (K) e trabalho (L), ou seja,

$$Y = f(L, K),$$

passou a incorporar em 1987, a partir dos estudos do economista Roberto Solow (1924-), a variável mudança tecnológica (A). Porém, com a incorporação da qualidade do meio ambiente que junto com a renda passa a ser entendida como riqueza social, a função de produção passa a ser expressa da seguinte forma (onde “N” é natureza e “E” qualidade do meio ambiente):

$$g(Y, E) = f(L, K, N, A)$$

Esta equação ampliada, ao apresentar a qualidade do meio ambiente como parte integrante da riqueza social, contribuiu para a visão da natureza enquanto patrimônio. O ser humano, por sua vez, passa a ser compreendido como ator mais complexo do que simplesmente um agente econômico produtor e consumidor de bens e serviços mediados pelas relações de produção e de mercado (DALCOMUNI, 2005, p.57).

Já Ekins (1992 apud MERICO, 2002, p. 19) traduziu um sistema de geração de riqueza em quatro capitais: Natural, humano, social-organizacional e manufaturado. Este modelo se difere do tradicional modelo simplificado entre terra, trabalho e capital: por entender que o fator terra é um recurso ambiental finito; a mão de obra para o fator trabalho não é abundante nem barata e; da visão neoclássica de que o desenvolvimento é quase que exclusivamente derivado do fator capital.

Segundo Ekins (1992), o capital natural possui três papéis: provisão de insumos para o processo econômico (solo, madeira, minérios); provisão direta de serviços ambientais, e; absorção de resíduos. O capital trabalho incorpora conceitos como conhecimento, habilidade, bem-estar, saúde e motivação. A adição do capital social-organizacional reflete a importância das instituições da sociedade para a criação de riquezas. O conceito tradicional de capital passa a ser denominado, com esta nova abordagem, de capital manufaturado.

Todavia, a legitimação e sistematização do desenvolvimento sustentável ocorreram com a publicação do relatório de Brundtland, intitulado “Nosso Futuro Comum”, que foi elaborado pela Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento no ano de 1987. Neste relatório ficou entendido que o desenvolvimento sustentável é capaz de embarcar o progresso econômico e social, sendo definido como: “o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades atuais da população, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das gerações futuras” (Dalcomuni, 1997, p. 20).

Desta forma, para incorporar o meio ambiente natural no desenvolvimento econômico foi necessário formar três pilares: o econômico (ampliação da base material), o social (com promoção de equidade) e o ambiental (com eco-eficiência na utilização dos recursos naturais), que conforme Dalcomuni (2005, p. 52) passa a ser entendido com “sentido estrito”.

Dalcomuni (2012, p.6) propõe trabalhar com um conceito de desenvolvimento sustentável “*latu senso*”, que se fundamenta em cinco dimensões: a) dimensão econômica; b) dimensão social; c) dimensão ambiental; d) dimensão político cultural e f) dimensão geográfico-espacial.

- a) A dimensão econômica refere-se à ampliação dos bens e serviços produzidos pela sociedade para atender a população que cresce e que cada vez mais sofisticada suas necessidades;
- b) A dimensão social significa a ampliação do acesso social à riqueza produzida, através de uma melhor distribuição dessa produção ampliada;
- c) A dimensão ambiental refere-se à busca do desenvolvimento econômico em harmonia com o ambiente natural, que passa a ser entendido não apenas como fonte de insumos, mas como patrimônio natural, ou seja, algo que deve ser melhorado, e não apenas mantido. Assim, a ênfase passa do risco da exaustão dos recursos para o resgate dos passivos ambientais, como a recuperação do ar, da água, da flora e da fauna;
- d) Dimensão político-social refere-se à promoção do desenvolvimento econômico num contexto de democracia e liberdade, junto com o respeito à diversidade étnico-cultural, e;
- e) Dimensão geográfico-espacial que refere-se ao desafio de harmonizar a distribuição espacial das atividades humanas, que podem ser produtivas ou não, mas que impactam de forma decisiva a sustentabilidade do desenvolvimento geográfico-espacial.

Desta forma, pode-se entender o “desenvolvimento sustentável como o principal desafio e a grande utopia do século XXI e vindouros” (DALCOMUNI, 2012, p. 6).

Na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, ocorrida no Rio de Janeiro em 1992 foi discutida e proposta políticas essenciais para alcançar um modelo básico de desenvolvimento sustentável que reconhecesse os limites do desenvolvimento econômico. Porém desde a Conferência de Estocolmo os avanços para implementar os compromissos assumidos foram inexpressivos.

Em 2002, em Johannesburgo foi realizada a Conferência Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável, conhecida como Rio+10, onde foram avaliados os avanços e obstáculos os compromissos assumidos em 1992, e propor medidas para viabilizar a sua implantação.

Uma das dificuldades levantadas foi a operacionalização, já que era muito difícil na época medir o “desenvolvimento”. De fato, os indicadores disponíveis eram baseados simplesmente no Produto Nacional Bruto – PNB que mediam basicamente

o crescimento econômico. O conceito de desenvolvimento estabelece questões mais amplas de melhorias na saúde e no estado nutricional; grau de escolaridade; acesso a recursos; aumento das liberdades fundamentais e uma melhor distribuição de renda; além é claro da renda real *per capita*. Na realidade, podem existir países com taxas de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) elevado, contudo não são capazes de resolver os problemas da pobreza, ou a má distribuição de renda, ou melhorar o acesso à saúde, ou melhorar o acesso à educação, ou a cultura.

Devido a estas dificuldades em medir o desenvolvimento, a ONU sugeriu a criação do Índice de Desenvolvimento Humano – IDH que se utiliza de indicadores da saúde, educação e do PIB *per capita*. Embora este índice seja um avanço nas formas de medir o desenvolvimento, ele ainda possui alguns problemas como a precariedade dos indicadores de educação e saúde. Além deste problema, o índice já nasceu obsoleto não contemplando a problemática ambiental.

A dificuldade de se construir mecanismos de mensuração da sustentabilidade legitimado em todo o mundo tem se mostrado muito mais complexo, devido à dificuldade de integração dos fatores biofísicos, psicológicos, econômicos e socioculturais. A utilização do PIB como indicador de desempenho econômico e social é preocupante porque em sua concepção, o PIB mede simplesmente a adição de bens e serviços na economia sem haver nenhuma preocupação dos benefícios que isto pode causar na sociedade, sendo utilizado para medir o crescimento econômico e não o bem estar ou a qualidade de vida.

O Governo francês insatisfeito com o atual estado das informações estatísticas idealizou em 2008 a *Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress – CMEPSP* que ficou mundialmente conhecida como “Comissão Stiglitz-Sen-Fitoussi”<sup>16</sup>. Esta comissão era formada por vinte e cinco especialistas com uma diversidade de visões em temas variados, desde a contabilidade nacional até à economia das mudanças climáticas (FEITOSA, 2010, p. 39).

A contribuição específica desta comissão para a construção de indicadores de desenvolvimento sustentável foi o de entender que medir a sustentabilidade é diferente da prática estatística básica. Para se adequar, são necessárias projeções e

---

<sup>16</sup> Devido à presença de dois detentores de premio Nobel de economia Joseph Stiglitz e Amartya Sen, sob a coordenação de Jean-Paul Fitoussi essa comissão foi chamada assim.

não apenas observações, além do que exige algumas respostas pré-estabelecidas a questões normativas. Além disso, não se trata apenas de avaliar a sustentabilidade em cada país separadamente, como o problema é global o que importa é o que cada país poderá fazer para se buscar a sustentabilidade (CMEPSP, 2009 Apud FEITOSA, 2010, p. 40).

Considerando a distinção entre a avaliação do “bem estar atual”, o que a sociedade sente do ambiente em que vive e as condições que são repassadas às gerações futuras, a Comissão dividiu-se em três grupos: *Classical GDP Issues*, *Quality of Life* e *Sustainable Development and Environment*. O primeiro grupo surge com o propósito de contrapor os problemas da utilização do PIB, surge também para considerar a renda e o consumo conjugado com a riqueza, olhando não apenas para a produção como também para outras formas de mensurar a renda em atividade não mercantil. Desta forma valoriza mais a distribuição de renda, do consumo e da riqueza (FEITOSA, 2010, p. 41).

O segundo grupo (*Quality of Life*) recomenda que a estatística possa incluir em suas análises medidas subjetivas de bem-estar, permitindo que as pessoas informem o que fazem da vida, suas experiências hedônicas e seus planos. Para que isso ocorra é preciso que estas instituições se armem de informações das diversas dimensões da qualidade de vida, e que permita a construção de inúmeros índices compostos ou sintéticos. Essas ações visam reduzir as desigualdades: na saúde, na educação, nas atividades pessoais, na voz política, nas conexões sociais, nas condições ambientais e na insegurança tanto pessoal quanto a econômica (FEITOSA, 2010, p. 41).

Para o grupo de trabalho *Sustainable Development and Environment*, a avaliação do desenvolvimento sustentável requer um conjunto sintético e selecionado de indicadores que permitam avaliar ao mesmo tempo a qualidade de vida e o desempenho econômico. É necessário também o acompanhamento dos indicadores físicos que possam sinalizar níveis perigosos de danos ao meio ambiente.

Toda a análise elaborada até aqui caminha na direção de que substituir a forma do recurso energético usado no desenvolvimento não alcançará sistematicamente um modelo de desenvolvimento sustentável. Além disso, a utilização de indicadores capazes de monitorar o progresso social deve ser alcançada, mas para isso é necessário determinar qual o nível que pretendemos alcançar e que isto não se

resuma simplesmente na quantificação dos bens e serviços.

A recente evolução do conceito de desenvolvimento sustentável argumenta que para a promoção da sustentabilidade do desenvolvimento é requerida uma nova base econômica diferente da atualmente praticada que promove a exaustão de recursos e a poluição. Assim se torna necessário uma nova economia, capaz de promover este desenvolvimento, qual seja a “economia verde”.

## 1.2 “ECONOMIA VERDE”: CONCEITO

O aumento da relevância das questões ambientais é originado na compreensão de que a sustentabilidade ambiental é primordial para o desenvolvimento de longo prazo de toda sociedade. Desta forma, essas questões estão sendo inseridas na agenda científica e nas políticas públicas de forma geral. Assim se encontra de um lado a perspectiva de que as ações humanas no meio ambiente poderão resultar em catástrofes<sup>17</sup>. E por outro lado, trata-se de uma visão estratégica que busca identificar oportunidades e potencialidades para alcançar a sustentabilidade nas dimensões econômica, social, ambiental, político social e geográfico espacial.

Neste contexto que surge o conceito de “economia verde”, definido pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA como “aquela que resulta na melhoria do bem estar humano e da igualdade social, ao mesmo tempo em que reduz significativamente os riscos ambientais e a escassez ecológica” (UNEP, 2011).

O conceito de “economia verde” não substitui o de desenvolvimento sustentável, pelo contrário, reforça um crescente reconhecimento de que a realização da sustentabilidade passa pela obtenção de uma economia apropriada. Neste sentido o relatório do UNEP (2011) complementa:

“Décadas de criação de uma nova riqueza através de um modelo de ‘economia marrom’ não lidaram de modo substancial com a marginalização social e o esgotamento de recursos, e ainda estamos longe de atingir os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio. A sustentabilidade continua sendo um objetivo vital a longo prazo, mas é preciso tornar a economia mais verde para chegarmos lá”.

Desta forma, a transição para uma “economia verde” irá requerer esforços de todos

---

<sup>17</sup>Ver Stern (2007) e IPCC (2007).

os segmentos da sociedade, especialmente do governo e do setor privado. A “economia verde” requer uma melhor igualdade social o que poderá beneficiar o Brasil, uma vez que o Brasil está na lista dos dez piores países do mundo em termos de distribuição de renda<sup>18</sup>. Para entender como a “economia verde” poderá contribuir para o desenvolvimento sustentável nas dimensões sociais, econômicas, ambientais, político-social e geográfico-espacial<sup>19</sup>, será apresentado na próxima seção os delineamentos de uma “economia verde”. Em termos conceituais, entende-se o conceito de “economia verde” como um aprofundamento do pilar econômico do conceito de desenvolvimento sustentável

### 1.2.1 Delineamentos de uma “economia verde”

O UNEP lançou em 2008 a Iniciativa “economia verde” (GEI, na sigla em inglês) como objetivo de apoiar o desenvolvimento global rumo a uma economia capaz de crescer economicamente, reduzindo a pressão sobre os recursos naturais e eliminando a pobreza, e possui três estratégias principais: a redução das emissões de carbono; aumento da eficiência energética e no uso de recursos e; a prevenção da perda da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos.

Assim, “economia verde” é a “economia que resulta em melhoria do bem estar humano e equidade social, ao mesmo tempo em que reduz significativamente os riscos ambientais e a demanda sobre recursos escassos do ecossistema”. Desta forma, a “economia verde” “representa um novo paradigma de crescimento econômico amigável com os ecossistemas terrestres e que também possa contribuir para a mitigação da pobreza”. (DALCOMUNI, 2012, p. 6).

O UNEP publicou em fevereiro de 2011 um relatório chamado *“Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication”*. Este documento analisa os aspectos macroeconômicos e as questões de sustentabilidade e a redução da pobreza. Espera-se que as políticas públicas venham a ser subsidiárias deste relatório, assim podem-se aumentar os investimentos nos setores considerados verdes.

---

<sup>18</sup>Conforme dados do PNUD (2010).

<sup>19</sup> No relatório do UNEP, se utiliza as três dimensões preconizadas pelo relatório de Brundtland (econômica, social e ambiental), entretanto, na abordagem de Dalcomuni foram identificadas cinco dimensões (econômica, social, ambiental, político-social e geográfico-espacial) ao qual se baseia este trabalho.



Este relatório defende que tornar a “economia verde” não implica necessariamente a redução do crescimento e do nível de emprego. Na verdade, a visão deste relatório é o oposto, que pode haver crescimento econômico. Porém, este crescimento deve estar alicerçado na geração de empregos decentes<sup>20</sup> e a erradicação da pobreza. Assim a economia continuaria a sua fase de expansão com equidade social.

A partir deste estudo, espera-se que os tomadores de decisão desenvolvam condições favoráveis para o aumento dos investimentos rumo à uma “economia verde”, baseada em três estratégias principais: 1) Estimular a mudança dos investimentos públicos e privados, incentivando setores críticos para a transição em direção à “economia verde”. 2) Demonstrar como a “economia verde” pode reduzir a pobreza persistente através de alguns setores como agricultura, florestas, pesca, água e energia. 3) Orientar sobre políticas que permitem essa mudança através da eliminação de subsídios perversos; identificação de falhas de mercado; estabelecimento de marcos regulatório ou; estímulos de investimentos sustentáveis.

Diante disso, busca-se desmistificar a idéia que mais perpassa as ciências econômicas de que há uma troca inevitável entre sustentabilidade ambiental e progresso econômico. De acordo com este relatório, há evidências substanciais de que o “esverdeamento” da economia não inibe a criação de riqueza ou a geração de oportunidades de emprego.

Outro mito é acreditar que a “economia verde” é um luxo destinado apenas aos países desenvolvidos. Sendo que a principal mensagem destacada no documento é que um “investimento de apenas 2% do PIB global em dez setores chave podem combater a pobreza e gerar um crescimento mais verde e eficiente”. Tal investimento pode ser o pontapé inicial rumo à uma “economia verde” de baixo carbono e uso eficiente de recursos naturais. Esse valor corresponde a US\$ 1,3 trilhão ao ano, que seria responsável por fomentar a economia global a níveis muito provavelmente superiores se comparado com os atuais modelos econômicos (UNEP, 2011).

Segundo o estudo, os dez setores identificados como fundamentais para tornar a economia global mais verde são: agricultura, construção, pesca, silvicultura,

---

<sup>20</sup>Empregos que proporcionem rendimentos adequados, proteção social e respeito aos direitos dos trabalhadores e que permitam a esses trabalhadores expressar sua opinião nas decisões que afetarão suas vidas. Fonte: OIT (2009).

abastecimento de energia, indústria, turismo, transporte, manejo de resíduos e água. Este relatório propõe ainda a alocação de recursos conforme quadro 1:

<b>Setor</b>	<b>Alocação de recursos</b>
Agricultura	US\$ 108 bilhões, incluindo as pequenas explorações.
Construção	US\$ 134 bilhões, destinado a programas de eficiência energética.
Pesca	US\$ 110 bilhões, incluindo a redução da capacidade da frota mundial.
Silvicultura	US\$15 bilhões para combate as mudanças climáticas
Energia	Mais de US\$ 360 bilhões
Indústria	US\$ 75 bilhões
Turismo	US\$ 135 bilhões
Transportes	US\$ 190 bilhões
Manejo de resíduos	US\$ 110 bilhões incluindo a reciclagem
Água	US\$ 110 bilhões, incluindo saneamento básico.
<b>Total</b>	<b>US\$ 1,3 trilhão</b>

**QUADRO 1 - DETALHAMENTO PARA INVESTIMENTO MUNDIAL PROPOSTO PARA OS DEZ SETORES FUNDAMENTAIS PARA A “ECONOMIA VERDE”**

Fonte: UNEP (2011).

Esse relatório apresenta resultados e recomendações por setores específicos, apontando as oportunidades geradas pela “economia verde”, dentre eles estão à redução da pobreza, a geração de emprego, o fortalecimento da equidade social e a manutenção e restauração do capital natural.

No setor de agricultura, a redução do desmatamento e o aumento no reflorestamento gerariam benefícios para as comunidades rurais, por exemplo, através da certificação da madeira entre outros. Uma agricultura mais verde irá assegurar alimento para a crescente população mundial, contudo sem causar prejuízos aos recursos naturais (UNEP, 2011).

Segundo o relatório, a escassez de água pode ser mitigada com o fomento de

investimentos na melhoria do fornecimento e uso racional da água<sup>21</sup>. Aliado a isso, a provisão de água potável e o saneamento poderão acelerar a transição para a “economia verde”, principalmente nos países em desenvolvimento (UNEP, 2011).

No setor energético o foco é investir em energia renovável por apresentar grandes oportunidades econômicas. Assim, as políticas governamentais podem desempenhar um papel importante nas estratégias da utilização dessa energia. A alocação de 1% do PIB mundial em eficiência energética e na expansão do uso de fontes renováveis de energia poderá criar empregos adicionais e produzir uma energia mais competitiva. Já um investimento de 1,25% do PIB global em eficiência energética pode reduzir a demanda por energia primária em 9% em 2020 e até 40% em 2050 (UNEP, 2011).

No âmbito do turismo, este se for bem planejado, poderá fortalecer economias locais e assim contribuir para reduzir a pobreza. Na pesca, investimento da gestão pesqueira, criando áreas de proteção marinha e a redução da capacidade das frotas poderão recuperar os recursos pesqueiros no planeta. Os benefícios para “esverdear” o setor serão entre 3 a 5 vezes maiores do que o valor do investimento proposto. No curto e médio prazos esse setor terá cortes nos empregos devido a sua recuperação, porém no longo prazo a oferta dos produtos da pesca será crescente novamente. Com investimento de US\$ 108 bilhões por ano na gestão de resíduos poderá ser triplicado a reciclagem global de resíduos (UNEP, 2011).

Na área de transportes, investimentos anuais em torno de 0,34% do PIB global poderão reduzir em até 80% o uso de petróleo e elevar os empregos em 6%. Os custos sociais e ambientais provocados pelo setor de transporte são de aproximadamente 10% do PIB de um país ou região. Para “esverdear” esse setor é necessário fomentar o uso de transportes públicos, transportes não motorizados, eficiência de combustíveis e desenvolvimento de veículos menos poluentes (UNEP, 2011).

Segundo essa visão, uma “economia verde” tem o potencial de promover o desenvolvimento sustentável, favorecendo o crescimento com geração de emprego e renda. Os investimentos verdes tem potencial de fortalecer setores e tecnologias

---

<sup>21</sup>Um exemplo de ações para é o programa “Produtores de água” do Governo do Estado do Espírito Santo, que remunera financeiramente o produtor rural que preservar as nascentes dos rios.

que serão os promotores do desenvolvimento econômico e social no futuro, incluindo as tecnologias de energia limpa e renovável, construções com eficiência energética e sistemas de transporte com baixa emissão de carbono (UNEP, 2011).

Reiterando o conceito de “economia verde”, este surge como um detalhamento do tipo de economia necessária para a promoção do desenvolvimento sustentável, no que se refere à sua dimensão econômica. O “esverdeamento” da economia surge como um instrumento mínimo de sua adequação à promoção do desenvolvimento sustentável, que no plano ideal seria o atingimento de uma economia ecológica<sup>22</sup>.

O foco deste trabalho é analisar a economia do hidrogênio como fonte de energia limpa e renovável e mitigadora dos danos ambientais provocados pelo uso dos combustíveis fósseis. Desta forma, a análise estará voltada para a redução do carbono numa perspectiva de “economia verde”. Assim na próxima seção será analisado o potencial do setor energético na mitigação e no abatimento das emissões de carbono, ajudando a promover a “economia verde”.

### **1.2.2 Promoção da “economia verde”**

A utilização de combustíveis de origem fóssil contribuiu para o aumento dos níveis de dióxido de carbono na atmosfera, desta forma o potencial para mitigação e abatimento de carbono passa pelo interesse da sociedade em mitigar os efeitos relacionados a essa concentração. Este desafio precisa da união de esforços de todas as nações, inclusive as que pouco emitem este tipo de gás, porque o problema é global e assim que deve ser tratado.

“Descarbonização” é o termo usado pelos cientistas para se referirem à proporção de átomos de carbono e de hidrogênio nas fontes de energia. É importante salientar que este processo já está presente na sociedade há muitos anos. A madeira que serviu para sustentar o desenvolvimento da humanidade por muitos séculos, sendo também a que possui uma das maiores proporções de átomo de carbono em relação ao átomo de hidrogênio, dez por um. O carvão que substituiu a madeira tinha uma

---

<sup>22</sup>A Economia Ecológica se fundamenta no funcionamento do sistema econômico, considerando as escalas temporal e espacial. Como é o meio natural que disponibiliza a energia, a matéria-prima e a absorção de resíduos provenientes do próprio funcionamento da economia, este deve ser inserido no meio natural, identificando que o sistema econômico se encaixa dentro de um sistema maior, que seja, o ambiente natural (AMAZONAS, 2012).

relação de dois átomos de carbono por um átomo de hidrogênio. O petróleo possui um de carbono por dois de hidrogênio e gás natural possui um de carbono para cada quatro de hidrogênio (RIFKIN, 2003, p. 181).

Isto indica que a fonte de energia primordial usada na história da humanidade foi sucessivamente liberando cada vez menos carbono na atmosfera do que a sua predecessora. Segundo Neboja Nakicenovic (1996 apud RIFKIN, 2003, p. 181) estima-se que a emissão de carbono por unidade de energia primária consumida no globo caiu 0,3% ao ano, levando em consideração os últimos 140 anos. Desta forma, a utilização do hidrogênio como vetor energético pode representar a “descarbonização” completa, podendo beneficiar toda a sociedade já que não emite nenhuma molécula de carbono.

Neste sentido Ausubel (1997 apud RIFKIN, 2003, p. 181) argumenta:

O fato mais importante, surpreendente e afortunado a emergir dos estudos de energia é que por 200 anos o mundo favoreceu progressivamente os átomos de hidrogênio em detrimento dos de carbono. [...] A tendência à ‘descarbonização’ é essencial para que se compreenda a evolução do sistema de energia.

Porém mesmo com esta tendência à “descarbonização”, a pressão sofrida pelo meio ambiente ainda pode ameaçar a vida na Terra devido às mudanças climáticas. O dióxido de carbono liberado pela queima dos combustíveis fósseis se espalha por toda a atmosfera terrestre, e não somente onde este foi liberado. Assim é necessário compreender este fenômeno do aquecimento que está ocorrendo em todo o mundo.

Em meio à discussão da causa do aumento da temperatura média da Terra, ela pode ser causada por um fenômeno natural ou pela ação antrópica. De fato, os Gases do Efeito Estufa (GEE) são substâncias gasosas naturais responsáveis pelo aquecimento da Terra. Esses gases são responsáveis por reter na atmosfera parte da radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre, mantendo o planeta aquecido, sendo vital para a manutenção da vida.

Este fenômeno ocorre quando a radiação solar chega à superfície da Terra, uma parte é refletida para o espaço e outra parte é absorvida pela atmosfera devido aos GEE, aquecendo o planeta. A atividade antrópica tem aumentado a proporção desses gases na atmosfera<sup>23</sup>, e isto poderá elevar a temperatura média de todo o

---

<sup>23</sup> Principalmente nas atividades de geração de energia primária, já que grande parte é gerada através da queima de combustíveis fósseis que liberam grandes quantidades de dióxido de carbono.

planeta.

Embora haja incerteza quanto à magnitude deste fenômeno, ele é reconhecido cada vez mais pela comunidade científica. Neste sentido, destaca-se os esforços do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima – IPCC que definiu mudança climática como “[...] *change in the estate of the climate that can be identified (e.g. using statistical tests) by changes in the mean and/or the variability of its properties, and that persists for an extended period, typically decades or longer*” (IPCC, 2007, p. 30).

O processo do efeito estufa é distinguido por várias facetas, e não somente aumento de temperatura, podendo inclusive causar baixas temperaturas<sup>24</sup>. Ou seja, o efeito estufa se caracteriza pela mudança do clima e o aumento da temperatura média global é apenas um índice para verificar a mudança climática. Conforme o quadro 2 analisa-se os impactos dos eventos extremos no clima.

<b>Fenômeno e direção da tendência</b>	<b>Probabilidade da tendência futura*</b>
Dias mais quentes e noites mais frias	Praticamente certo
Surtos/ondas de calor: frequência aumenta na maioria das áreas	Muito Provável
Ocorrência de alta precipitação: frequência aumenta na maioria das áreas	Muito provável
Aumento das áreas afetadas pela seca	Provável
Aumento das atividades de ciclones tropicais intensos	Provável
Aumento da incidência de níveis do mar muito altos (exceto Tsunamis)	Provável

\*Com base em projeções para o século 21, usando-se os cenários SRES.

## **QUADRO 2 – IMPACTOS DECORRENTES DOS EVENTOS EXTREMOS DO TEMPO, CLIMA E NÍVEL DO OCEANO.**

Fonte: IPCC (2007, p. 53).

A mudança climática é um desafio global, já que as causas e as ações ultrapassam as barreiras territoriais de cada país. Além disso, é um desafio de longo prazo,

<sup>24</sup> Como por exemplo, se ocorrer um mudança na corrente marinha do Golfo, pode congelar toda a Europa Ocidental (KEMP, 1996, p. 152).

porque envolve as questões de gerações futuras. Por isso a resposta que a humanidade terá que dar para enfrentar este problema tem que ser da mesma forma (global e de longo prazo). Esse desafio para a humanidade é um teste à capacidade humana de gerir as consequências de suas próprias ações. Kemp (1996, p. 153) enumera três formas de políticas de intervenção para lidar com o efeito estufa:

- a) Opções que podem eliminar ou reduzir as emissões de gases de efeito estufa;
- b) Opções em que as emissões são compensadas pela remoção de GEE da atmosfera, bloqueando a radiação solar incidente, ou então alterando a reflexão ou as propriedades de absorção da radiação solar pela superfície da Terra;
- c) Opções que podem ajudar os sistemas humanos e ecológicos a se ajustarem ou adaptarem às novas condições climáticas.

As opções “a” e “b” são entendidas como mitigadoras enquanto que a “c” é a adaptativa. A opção “a” é a preventiva, como a redução do consumo de energia, deter o desmatamento e a utilização de combustíveis “limpos”. A segunda opção pode ser entendida também como políticas de engenharia de clima ou geo-engenharia por tentar mudar características de absorção da radiação solar por meio da mudança do albedo da Terra<sup>25</sup>, entre outros.

Em termos da estratégia de adaptação às alterações climáticas é isso que o homem tem feito até hoje, como por exemplo, o uso racional do ar condicionado ou mudanças nos hábitos alimentares. É necessário entender que há um grande leque de possibilidades para enfrentar a mudança climática, desde grandes correções técnicas até mesmo uma simples mudança de comportamento pode fazer a diferença (KEMP, 1996, p. 153).

No quadro 3 há a contribuição do IPCC (2007) para o debate garantindo uma base de análise da capacidade de adaptação e mitigação das emissões:

---

<sup>25</sup> É a parte da radiação que a Terra reflete da luz solar. Por exemplo, em superfícies brancas haverá uma maior reflexividade do que nas superfícies pretas, devido às características de absorção de luz de cada espectro de cor (MANAGO & DOMICIANO, 2009).

Setor	As principais tecnologias de mitigação e práticas atualmente disponíveis comercialmente	Políticas, medidas e instrumentos que se mostraram ambientalmente eficazes.
Abastecimento de Energia	Oferta e eficiência de distribuição; combustível, do carvão para o gás, energia nuclear; calor renovável e de energia (hidrelétricas, solar, eólica, geotérmica e bioenergia); produção combinada de calor e eletricidade; primeiras aplicações de captura e armazenamento de dióxido de carbono (CCS) (armazenamento do CO <sub>2</sub> removido do gás natural); <i>CCS para o gás, biomassa e carvão em instalações de geração de eletricidade, energia nuclear avançada; energia renovável avançada, incluindo a das marés e a energia das ondas, concentrador-solar e solar fotovoltaica.</i>	Redução de subsídios aos combustíveis fósseis, os impostos ou taxas de carbono dos combustíveis fósseis.
		<i>Feed-in tariffs</i> para tecnologias de energia renovável; obrigações de energia renováveis; subsídios para produtores.
Transportes	Veículos mais eficientes, veículos híbridos, veículos a diesel mais limpo; bicombustíveis; modais de transporte rodoviário para o ferroviário e sistemas de transporte público, transporte não motorizado (ciclismo, caminhada); uso da terra e planejamento de transportes, <i>os bicombustíveis de segunda geração, maior eficiência aeronaves; avançados veículos elétricos e híbridos com baterias mais potentes e confiáveis.</i>	Economia obrigatória de combustível; mistura de bicombustíveis e normas de CO <sub>2</sub> para o transporte rodoviário
		Os impostos sobre a compra e registro dos veículos, sobre o uso de combustíveis e sobre estradas e estacionamentos.
		Influência da necessidade de mobilidade através de regulamentos de uso do território e planejamento da infraestrutura, investimento em transportes públicos de qualidade e em formas de transporte não motorizados.
Construções	Iluminação eficiente e iluminação natural; aparelhos elétricos, de aquecimento e de refrigeração mais eficientes; fogões com melhor isolamento; projeto solar ativo e passivo para aquecimento e arrefecimento; fluidos de refrigeração alternativos, valorização e reciclagem de gases fluorados; <i>projeto integrado de edifícios comerciais, incluindo tecnologias, tais como medidores inteligentes que fornecem controle, energia solar fotovoltaica integrada em edifícios.</i>	Padrões de decoração e rotulagem.
		Códigos de construção e certificação.
		Programas de gestão da demanda.
		Programas de liderança do setor público, incluindo contratos.
		Incentivos para empresas de serviços energéticos (ESCO).

### QUADRO 3 – EXEMPLOS SELECIONADOS DE TECNOLOGIAS E POLÍTICAS PARA MITIGAÇÃO SOCIAL

Fonte: IPCC, 2007, p. 60.

Com a dificuldade de estabelecer as prioridades para as ações de diminuição dos GEE, analisa-se a curva de custo de abatimento elaborada por McKinsey & Company por oferecer uma base quantitativa de 200 oportunidades de redução da emissão dos GEE. Com isso, permite estabelecer discussões sobre as ações que



seriam as mais eficazes na redução de emissões e qual o custo de cada uma delas. Desta forma foi possível realizar um mapeamento global para reduzir as emissões do GEE entre dez grandes setores e vinte e uma regiões do mundo.

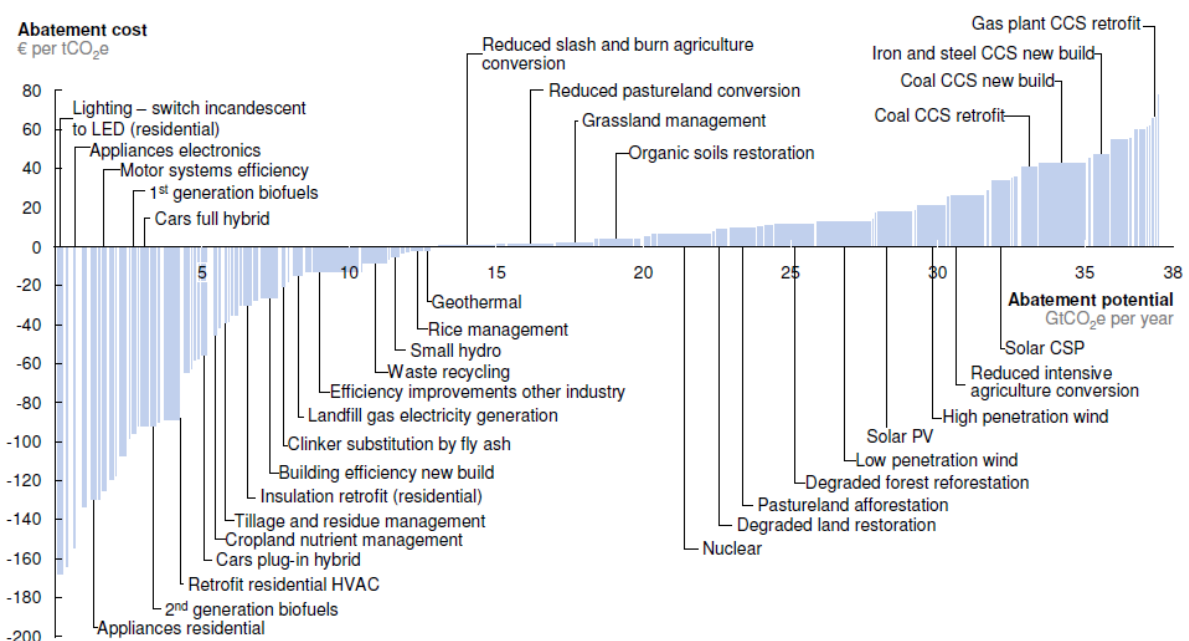


Figura 3 – Curva de custo de abatimento de emissões

Fonte: MCKINSEY, 2010, p. 8

Essa definição de prioridades está ocorrendo no contexto em que os países estão discutindo metas ambiciosas para a redução das emissões de carbono na atmosfera e tentam estabelecer um debate sobre a viabilidade técnica e econômica, em que oportunidades de redução das emissões devem ser perseguidas com opções de custos diferentes.

As opções são as mais variadas e entre as que refletem economias por tonelada evitada ao invés de custos, pode-se citar o isolamento térmico das edificações, o fim do modo *standy-by* dos eletrodomésticos e o uso do etanol. Com custos inferiores a € 20 por tonelada de CO<sub>2</sub> evitada se encontra a utilização da energia nuclear, do etanol de celulose, do manejo apropriado, do reflorestamento entre outros. Com custos entre € 20 e € 40 por tonelada de CO<sub>2</sub> evitada estão as ações de contenção do desmatamento de florestas tropicais e sistemas de captura e armazenamento de carbono.

Segundo Mckinsey (2010, pp. 8-10) existe um potencial até 2030 para reduzir as emissões de GEE em 35% se comparados aos níveis de 1990, ou 70% aos níveis previstos que seria visto em 2030 caso nada fosse feito. Se as ações mencionadas fossem colocadas em prática seria suficiente para manter o aquecimento global abaixo dos dois graus Celsius. Essa meta é um grande desafio porque depende de que todas as regiões e setores capturem perto do potencial de redução que está disponível e um atraso de dez anos torna o seu alcance impossível.

Esse conjunto tem um custo estimado em todo mundo da ordem de € 200 a € 350 bilhões anuais até 2030, o que representa 1% do PIB global em 2030. Neste caso os financiamentos dos esforços de redução do GEE são estimados em € 530 bilhões por ano em 2020 ou € 810 bilhões por ano em 2030 (MCKINSEY, 2010, pp. 8-10).

As principais contribuições destes estudos foram classificar as diversas ações, permitindo racionalizar esforços dos agentes empenhados nos processos de transição rumo a uma “economia verde”, além de definir prioridades por meio de diversos critérios, como custos envolvidos. Como este tema envolve uma complexidade de questões ambientais, econômicas, sociais e tecnológicas e como o objetivo deste trabalho é analisar os impactos do hidrogênio combustível na promoção de uma “economia verde” de baixo carbono, se faz necessário analisar o contexto das emissões mundiais de carbono, que será apresentado na próxima seção.

### **1.2.3 As emissões de carbono no mundo**

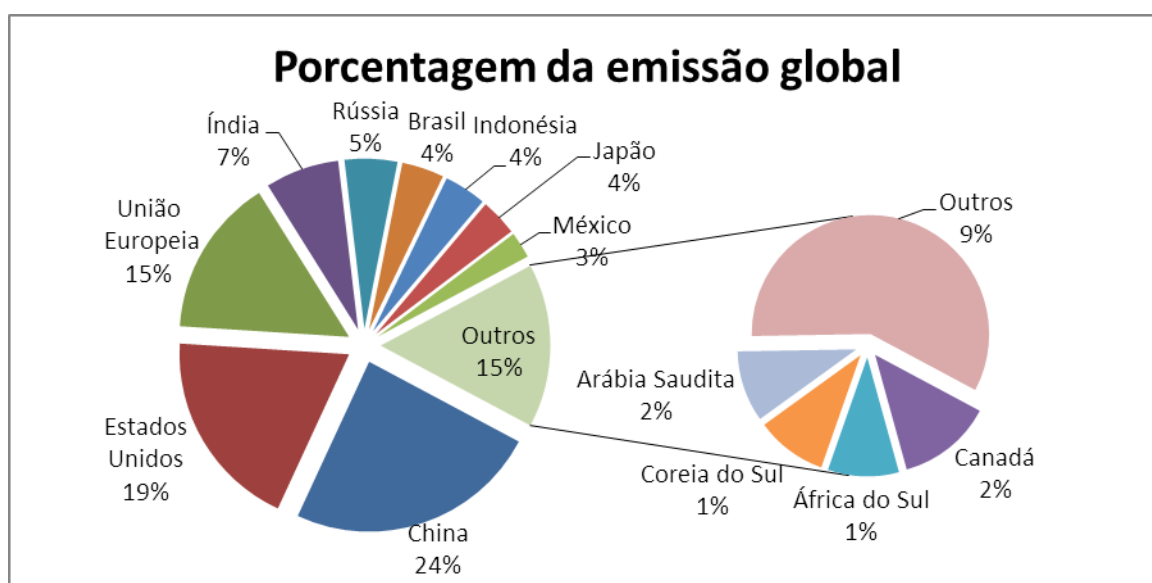
O uso da atmosfera é um exemplo da globalização do recurso natural, já que está presente em todo o mundo. Se esse recurso fosse utilizado com condições de eficiência econômica, esse importante recurso não seria um problema. Isso se deve ao fato que o uso da atmosfera gera custos e benefícios que não são captados pelo mercado, embora estes recursos tenham valor econômico, o sistema de preços não lhes confere um preço adequado.

O problema do sistema de preços é justamente o fato de a atmosfera ser um bem público, fazendo com que os direitos de propriedade não sejam plenamente definidos, e desta forma o sistema de preços falha, ocasionando a ineficiência das trocas por outros bens. Por exemplo, o uso de combustíveis fósseis contamina o ar

com dióxido de carbono, porém o valor deste combustível não reflete essa poluição ocasionada, mas somente o custo deste. Ou seja, o sistema de preços não internaliza o preço da poluição ocasionado pelo uso deste tipo de combustível (MOTTA, 2006, p. 180).

Para a transição para uma economia com baixas emissões de carbono se faz necessário que nos países ricos haja uma acelerada diminuição da emissão de carbono *per capita* e nos países de renda média que haja uma redução acelerada da intensidade de carbono no PIB, assim os países pobres ainda teriam um espaço para crescimento das emissões *per capita* (VIOLA, 2011, p. 43).

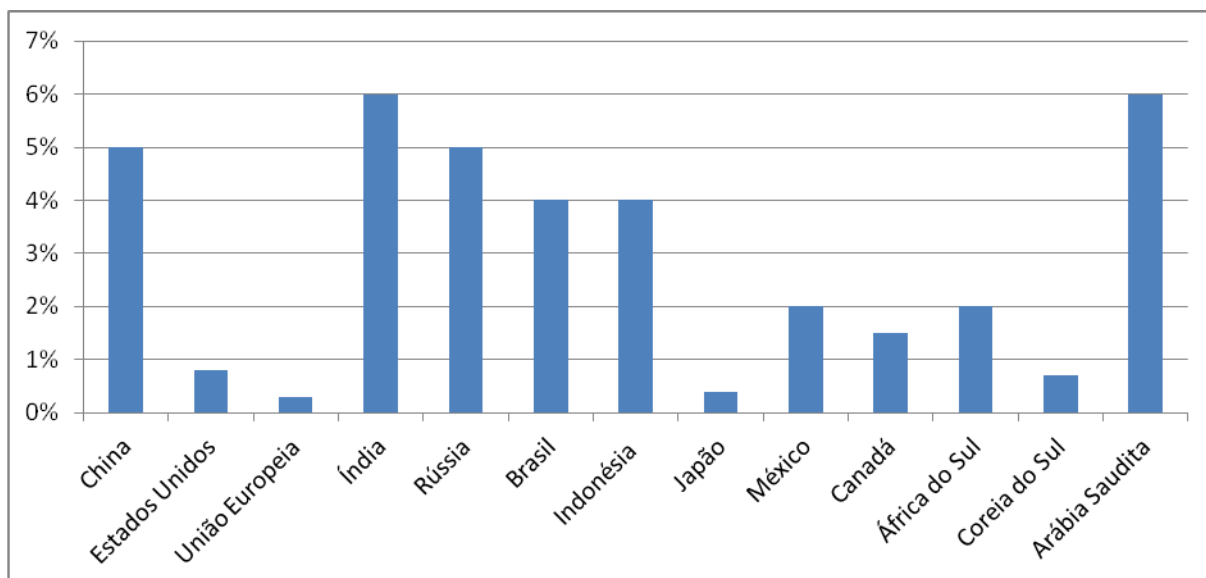
Segundo informações da *Netherlands Environmental Assessment Agency*<sup>26</sup> na primeira década deste século houve um aumento de 3% na emissão dos GEE. Este instituto mapeou os maiores emissores do mundo incluindo os dados referentes a desmatamento, conforme mostrado nos gráficos 1 e 2:



**GRÁFICO 1 - OS MAIORES EMISSORES DE CARBONO NO MUNDO**

Fonte: Viola, 2011, pp. 43-44.

<sup>26</sup> Um dos mais importantes institutos produtor de dados sobre emissões de gases do efeito estufa do mundo.



**GRÁFICO 2 - TAXA DE CRESCIMENTO MÉDIO DA EMISSÃO DE CARBONO  
2001-2010**

Fonte: Viola, 2011, pp. 43-44.

Para a discussão do desenvolvimento sustentável é frequente a utilização das emissões de carbono equivalente<sup>27</sup> como indicador de sustentabilidade, tendo em vista a importância para o controle das emissões dos GEE e as mudanças climáticas resultantes. A utilização deste indicador, embora não seja o mais indicado, já que exclui várias formas de interferência humana nos recursos naturais, é o mecanismo mais consistente até agora para monitorar o desenvolvimento sustentável em escala global. No quadro 4 é possível perceber que a China é o maior emissor de GEE do planeta em termo de toneladas de carbono equivalente (6,5 bilhões), porém, se for analisado as emissões em termos *per capita* ou a partir da razão em relação ao PIB, a China se encontra com uma intensidade menor do que países como os Estados Unidos, Japão e Rússia. De fato, a análise das emissões globais dos GEE não deve ser realizada somente em termos absolutos de emissão de carbono equivalente, mas devem ser analisados outros indicadores e fatores para que o resultado seja mais conciso, uma vez que os países em desenvolvimento como a China, embora seja o maior emissor destes gases, não o é necessariamente em termos de emissão *per capita* e por PIB.

<sup>27</sup> Carbono equivalente é uma medida métrica para comparar as emissões de vários Gases de Efeito Estufa – GEE, baseado no potencial de aquecimento global de cada usando como parâmetro o dióxido de carbono, definido conforme a COP 3. Assim a quantidade de carbono equivalente é a multiplicação da quantidade emitida do gás pelo seu potencial de aquecimento (IPAM, 2011, p. 53).

País	Toneladas de carbono equivalente	Toneladas <i>per capita</i>	Tonelada de carbono por cada US\$ 1.000 de PIB
Estados Unidos	5,8 bilhões	19	0,4
União Europeia	4,5 bilhões	10	0,3
China	6,5 bilhões	6	1,5
Índia	2,2 bilhões	1,7	1,4
Rússia	2 bilhões	14	1,3
Japão	1,6 bilhões	12	0,15

#### **QUADRO 4 – OS PRINCIPAIS EMISSORES DE CARBONO E PRINCIPAIS INDICADORES**

Fonte: Viola, 2011, pp. 44-50

Em 2008 o Consenso de Copenhague, formado por pesquisadores da *Copenhagen Business School*, ajuda a comunidade internacional a solucionar os maiores desafios da sociedade e como fazê-lo da forma mais rentável possível. Assim destacam-se trinta ações dentre as quais estão suplementos de micronutrientes para crianças; agenda de desenvolvimento de Doha. Entre as ações referentes ao enfrentamento das mudanças climáticas destacam-se: P&D em tecnologias de baixo carbono; P&D e mitigação; e Mitigação que são priorizadas em 14º, 29º e 30º. Como os recursos são limitados é sempre importante a priorização de esforços que se baseiam em evidências metodológicas de mensuração. Porém, quando se enfatiza os problemas de curto prazo em detrimento dos problemas de longo prazo como a questão da mudança climática, que é reconhecido por uma grande parcela da comunidade científica, inclusive por este Consenso como um dos maiores desafios da humanidade.

Além deste, existe ainda o debate do indicador de intensidade de carbono que nada mais é do que a mensuração da quantidade emitida de carbono equivalente por

unidade do PIB. Assim será possível realizar uma análise da emissão de carbono distribuída geograficamente possibilitando que um melhor mecanismo de mensuração e sustentabilidade do desenvolvimento, estabelecendo metas e compromissos pelos diversos países do mundo.

Este indicador vem caindo no mundo inteiro, inclusive nos países em desenvolvimento, devido a uma melhor eficiência tecnológica. Assim a economia produz uma quantidade maior com uma emissão cada vez menor, porém este efeito é contrabalançado pelo aumento da população e da renda média, conforme mostra o quadro 5 que avalia a intensidade de dióxido de carbono por dólar, a população, a renda média e as emissões globais nos anos de 1990 e 2007.

Ano	Intensidade de dióxido por dólar	População	Renda média	Emissões globais
1990	860g	5,3 bilhões	US\$ 4.700,00	21,7 bilhões
2007	760g	6,6 bilhões	US\$ 5.900,00	30,0 bilhões

#### **QUADRO 5 – COMPARATIVO DA INTENSIDADE DE CARBONO NA ECONOMIA GLOBAL ENTRE 1990 E 2007**

Fonte: (Veiga, 2009, p. 45)

Analisando este quadro percebe-se que a intensidade de carbono tem-se reduzido entre os anos de 1990 a 2007, porém isso não significa que as emissões de carbono estão reduzindo, isso é devido ao aumento da população e da renda média mundial. Este fato constatado contraria as teses que enfatizam a mudança de comportamento como forma de reduzir o consumo total de energia. Todavia, alguns autores vêm demonstrando que a eficiência verificada em determinadas atividades migram para outras através de um efeito chamado de ricochete. Um exemplo deste fenômeno é o caso de uma família que adquire um carro que tem um consumo menor de combustível, e com a sobra de renda das despesas com combustível, essa família faz uma viagem de férias, ou seja, a redução do nível de consumo desta família durante o ano foi canalizado para outra atividade, que seja as férias (SORELL, 2007, p. 1).

Este efeito demonstra a complexidade do sistema, aliado a isso tem a questão do fato das políticas públicas atuais não se mostrarem suficientes para conter o atual estágio de concentração dos GEE na atmosfera. Além disso, como o problema da mudança climática é global este debate foi levado para discussões a nível internacional que são promovidos pela ONU. Como o carbono é o principal responsável pelo acúmulo dos GEE, seu controle virou parâmetro para as negociações internacionais.

A ONU através do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA estabeleceu em 1992 os fundamentos do que seria intitulado de Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudança no Clima (UNFCCC) sendo assinada por 189 nações. Esta Convenção compromete as nações que assinaram o termo a um objetivo de longo prazo para a estabilização da emissão dos GEE para um nível aceitável de interferência antrópica no sistema climático da Terra. Essas nações se reúnem todos os anos para discutir a mudança climática e um breve relato histórico segue no quadro 6.

<b>Ano</b>	<b>Conferencia das Partes (COP)</b>	<b>Principais resultados</b>
1995	COP 1 – Berlin, Alemanha.	Mandato de Berlim – Destaque para a necessidade de criação de um protocolo contendo metas de redução de emissões e um protocolo contendo metas de redução de emissões a ser apresentado até a COP 3.
1996	COP 2 – Genebra, Suíça.	O 2º Relatório do IPCC foi considerado como referência para subsidiar ações futuras.
1997	COP 3 – Quioto, Japão.	Protocolo de Quioto – Apresenta metas de redução de emissão de carbono para os países desenvolvidos de 5,2% em relação aos níveis de 1990. Para o primeiro período de compromisso (1998-2012) e os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo, único aplicável ao Brasil; Implementação conjunta e mercado de emissões.
1998	COP 4 – Buenos Aires, Argentina.	Plano de Ação de Buenos Aires e definição sobre um cronograma de trabalho para atividade do Protocolo de Quioto até a COP 6.
1999	COP 5 – Bonn, Alemanha.	Discussão sobre o Protocolo de Quioto.
2000	COP 6 – Haia, Holanda (parte 1).	Não se chegou a um acordo.
2001	COP 6 – Bonn, Alemanha (parte 2).	Um acordo foi negociado para as discussões sobre o Protocolo de Quioto – Foco na ratificação do protocolo de Quioto, mas com muitas incertezas.
2001	COP 7 - Marrakesh, Marrocos.	Foco na ratificação do Protocolo de Quioto e muitas expectativas.

2002	COP 8 – Nova Delhi, Índia.	Declaração de Nova Delhi – Foco mitigação de gases de efeito estufa e redução de vulnerabilidades. As partes do Protocolo de Quioto concordaram sobre regras e procedimento de MDL e forneceram orientações para o Fundo para países menos desenvolvidos – <i>Last Developed Countries</i> (LDC's).
2003	COP 9 – Milão, Itália.	Destacou o impasse entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, e a complexidade das negociações.
2004	COP 10 – Buenos Aires, Argentina.	Discussão sobre as diversas formas de promover a participação de outros países no processo: Necessidade de comprovação da redução de emissões e GEE pelos desenvolvidos.
2005	COP 11 – Montreal, Canadá.	Implementação do Protocolo de Quioto e discussão sobre o seu funcionamento, bem como o da Convenção. Iniciado processo para discutir as ações de longo prazo para combater as mudanças climáticas.
2006	COP 12 – Nairóbi, Quênia.	Sediada na África, foi dado um enfoque nos países mais vulneráveis e nos temas adaptação e capacitação. O Brasil apresentou a proposta para incentivos positivos para reduzir emissões oriundas de desmatamento e da degradação de Florestas (REDD) em nações em desenvolvimento.
2007	COP 13 – Bali, Indonésia.	Mapa do Caminho de Bali ( <i>Bali Road Map</i> ) e os “ <i>building blocks</i> ” – trás os trilhos de negociação: Grupo de Trabalho sobre Ação Cooperativa de Longo Prazo no âmbito da Convenção (AWG-LCA, em inglês) e o Grupo de Trabalho sobre o Protocolo de Quioto (AWG-KP, em inglês).
2008	COP 14 – Poznan, Polônia.	Reuniões do AWG-LCA e AWG-KG além da SBI (Corpo Subsidiário para Implementação) e SBSTA (Corpo Subsidiário de Assessoria Científica e Tecnológica).
2009	COP 15 – Copenhagen, Dinamarca.	Não conseguiu articular um novo tratado climático. Reconhece que é necessário evitar a elevação da temperatura do planeta acima de 2º C, mas não especifica obrigações e ações para que tal objetivo seja alcançado.
2010	COP 16 – Cancun, México.	Foi estabelecido um nível mínimo para os compromissos de corte de emissões, foi criado o Fundo Verde Climático (GCF) que agilizará a disponibilização de recursos para que comunidades possam enfrentar os impactos climáticos. Outra foi dar uma sobrevida ao Protocolo de Quioto.
2011	COP 17 Durban, África do Sul.	Determina uma segunda fase para o Protocolo de Quioto, estabelece o mecanismo que deve reger o Fundo Verde para o Clima e traça um roteiro para um novo acordo global.

## QUADRO 6 – CRONOLOGIA DAS NEGOCIAÇÕES SOBRE MUDANÇA DO CLIMA

Fontes: (FEITOSA, 2010, p. 62) e (NOVA AMBI, 2012).

Uma das mais importantes conferências foi sem dúvida a COP-3 sediada em Quioto no Japão, culminando com Protocolo de Quioto, em que 160 nações assinaram o acordo, representando um avanço na tentativa de mitigar os danos advindos do aquecimento global. Este protocolo envolve metas para países industrializados de



redução de emissão<sup>28</sup> de carbono na atmosfera. Este protocolo operava com três mecanismos de flexibilização que são: Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), implementação Conjunta e o Mercado de Emissões. Como os Estados Unidos é o principal emissor dos GEE no mundo, sua recusa em ratificar o protocolo foi recebida com preocupação pela comunidade internacional.

Já a COP-15 em Copenhague na Dinamarca contou com a presença mais efetiva dos Estados Unidos, porém ficou longe de elaborar uma proposta negociável entre as nações, além disso, o sistema da ONU que não aprova uma proposta se no mínimo uma nação a recusar revela a complexidade de se construir essas propostas para a construção de um arranjo de governança em nível global (FEITOSA, 2010, p. 63).

Para a continuação desta discussão, entre os dias 13 a 22 de junho de 2012 será realizado no Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio + 20) e trará como tema: A “economia verde” no contexto do desenvolvimento sustentável e da erradicação da pobreza e; A estrutura institucional para o desenvolvimento sustentável.

O objetivo desta Conferência é a renovação do compromisso político com o desenvolvimento sustentável, por meio da avaliação do progresso e das lacunas na implementação das decisões adotadas pelas principais cúpulas sobre o assunto e do tratamento de temas novos e emergentes (RIO +20, 2011).

Uma colocação que se faz é “se os avanços no combate ao aquecimento global são benéficos a todos e o retrocesso igualmente prejudicial, o que dificulta a construção de cooperações para um acordo multilateral?” Para responder a essa questão deve-se analisar três importantes constatações. A primeira é que os custos para cada país são elevados, mas os benefícios são globais, desta forma abre brechas para que ações de alguns países não sejam reconhecidas ou não puderem ser verificadas, assim haverá um benefício para a comunidade internacional a custo de um único país.

Em segundo, como os impactos do aquecimento global afeta cada país de forma diferente, e levando em consideração que estes impactos são incertos, assim a

---

<sup>28</sup> A média de redução da emissão dos países industrializados é de em média 5,2% inferior ao ano 1990 para o período correspondente a 2008-2012.

cooperação internacional fica mais difícil. E por último, os GEE ficam na atmosfera por um período aproximado de cem anos, assim deve-se atribuir a responsabilidade diferenciada pela geração que ocasionou o problema sem se esquecer de que se deve levar em conta também as emissões futuras de gás carbono.

Pela abordagem histórica do aquecimento global, as grandes nações desenvolvidas teriam que ter uma participação maior na redução das emissões dos GEE, já que seu processo de desenvolvimento levou para a atmosfera toneladas de dióxido de carbono, assim todas as nações devem contribuir para a redução das emissões, porém as nações já desenvolvidas deveriam contribuir ainda mais. Assim os países em desenvolvimento não precisariam se comprometer em reduzir suas emissões e assim não seriam forçados a estagnar suas economias em prol de uma causa que eles não foram responsáveis desde o início do processo histórico.

Todavia, o argumento histórico esbarra na perspectiva de que as nações em desenvolvimento possuem um ritmo de crescimento maior do que as nações já desenvolvidas assim esses países poderão ter uma contribuição na emissão de carbono para a atmosfera igual à dos Estados Unidos e da Europa na década de 2030. Este fator se deve porque uma economia desenvolvida pode atingir uma estabilidade das emissões mais facilmente, enquanto que os países emergentes ainda terão que ampliar o consumo de energia e consequentemente de emissão de carbono.

Contudo, a transição para a “economia verde” ainda depende das ações dos grandes emissores globais e não está sujeito apenas ao que tem sido discutido no nível de COP’s. Como este processo é guiado por vetores como a segurança energética e as oportunidades geradas por esta onda de desenvolvimento, espera-se que se transforme todo o sistema energético mundial rumo a uma “economia verde”.

Neste sentido Viola (2011, p. 53) destaca que:

“a transição para uma economia internacional de baixo carbono necessitaria de um grande acordo internacional que deveria ser apoiado por uma série de mudanças comportamentais, bem como por desenvolvimentos tecnológicos e econômicos simultâneos e complementares”.

Conforme Viola (2011, p. 53) a literatura dos últimos anos assinala treze vetores

para essa transição. 1) Acelerar o ritmo de crescimento da eficiência energética<sup>29</sup> no uso residencial, industrial, nos transportes e no planejamento urbano. E ainda aumentar a reciclagem. 2) Aumentar a participação de energias não fósseis e renováveis na matriz energética mundial. 3) aumentar a participação da energia nuclear na matriz energética mundial<sup>30</sup>. 4) Desenvolver arquiteturas reguladoras para promover o uso de veículos híbridos. Aumentar o uso do transporte coletivo. Utilizar veículos mais leves e menores. 5) Diminuir drasticamente o desmatamento, além de reflorestar as áreas já degradadas.

6) Incrementar técnicas agrícolas que promovam a maior eficiência deste setor. Redução do consumo de carne bovina por parte dos países ricos<sup>31</sup>. 7) Usar a água de forma eficiente e tratar o lixo e o esgoto. 8) promover a estabilização da população global. 9) acelerar o desenvolvimento de tecnologias que capturam e sequestram o carbono. 10) Aumentar a eficiência do transporte aéreo<sup>32</sup>. 11) acelerar o desenvolvimento da célula a combustível de hidrogênio. 12) promover acordos internacionais para o desenvolvimento de tecnologia do baixo carbono. 13) Mudança de valores e cultura da sociedade.

Em síntese, a “economia verde” é um caminho em direção ao desenvolvimento sustentável: na melhoria do bem estar humano; na equidade social; na redução dos riscos ambientais, e; na redução da demanda sobre os escassos recursos do ecossistema. Contexto em que a utilização do hidrogênio como vetor energético limpo e renovável figura como um instrumento de promoção da sustentabilidade do desenvolvimento, presentemente em análise. A energia do hidrogênio é considerada limpa, uma vez que a emissão gerada pela sua utilização não contém nenhuma molécula de carbono, constituindo-se somente de água, calor e energia elétrica. No capítulo subsequente apresenta-se, portanto, os conceitos teóricos de energia limpa

---

<sup>29</sup> Segundo o autor, embora o capitalismo caminhe para a “descarbonização” o ritmo precisa ser incrementado e acelerado.

<sup>30</sup> Existe a perspectiva de desenvolvimento de geradores nucleares de quarta geração, aumentando a segurança de operação. Seu uso é considerado muito importante pela UNEP (2011) para o processo de “descarbonização” em países como China, Estados Unidos, Índia, Rússia, Indonésia e México, mesmo que ainda não foi resolvido o problema dos depósitos radioativos. Há de se destacar que esta dissertação não recomenda a utilização desta fonte de geração devido ao risco associado a sua utilização e descarte do material radioativo.

<sup>31</sup> A carne bovina é um dos maiores responsáveis pela emissão de metano no mundo, por isso a expansão do consumo por parte dos países em desenvolvimento deve ser compensada pela redução do consumo nos países ricos.

<sup>32</sup> Por exemplo, se utilizando da tecnologia disponível de teleconferência, que diminuam a necessidades das viagens.

e renovável, bem como o mercado energético mundial e a forte relação existente entre crescimento econômico e emissão dos GEE. Será apresentado também uma alternativa limpa e renovável de produção de energia a partir do hidrogênio, identificando as soluções tecnológicas já existentes e as ainda em desenvolvimento rumo à uma economia menos dependente da emissão de carbono.

## **CAPÍTULO 2**

### **ENERGIA LIMPA E RENOVÁVEL; A PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO HIDROGÊNIO: CONCEITOS, ASPECTOS TÉCNICOS E PANORAMA INTERNACIONAL.**

Para a construção deste capítulo faz-se necessária uma introdução a respeito da busca de fontes alternativas de energia que não agredem o ambiente natural, também denominadas fontes de energia limpa e renovável.

Como a matriz energética mundial é baseada em combustíveis fósseis, identifica-se uma correlação positiva entre crescimento econômico e o acúmulo dos Gases de Efeito Estufa – GEE na atmosfera que contribuem para as mudanças climáticas globais. Como um nível de crescimento tem que ser mantido para a melhoria da qualidade de vida, a análise da questão energética é fundamental para uma reavaliação do modo de vida e dos padrões de consumo da sociedade, mudando a estrutura de análise econômica para uma nova forma de mensurar os níveis de desenvolvimento econômico. Nesse contexto a busca de fontes limpas e renováveis de energia renova-se em importância.

Para melhor compreensão do tema, este capítulo foi dividido em três seções: a primeira trata dos conceitos de energia e energia limpa e renovável, apresenta também os debates acerca do crescimento econômico e uso de energia, da matriz energética mundial e da pressão ambiental exercida pelo setor energético no meio ambiente no mundo; na segunda seção será exposta a alternativa de produção de energia a partir do hidrogênio, onde serão apresentadas as soluções tecnológicas existentes e em desenvolvimento para a utilização do hidrogênio como um vetor energético limpo e que pode contribuir para mitigar os efeitos nocivos do dióxido de carbono na atmosfera; e finalmente na terceira seção serão mostradas as iniciativas e esforços mundiais em direção ao uso do hidrogênio como vetor energético no mundo.

## 2.1 ENERGIA, ENERGIA LIMPA E RENOVÁVEL E MATRIZ.

### ENERGÉTICA MUNDIAL

A energia é retratada como um bem básico para a garantia do desenvolvimento ao ser humano. A energia é fundamental propiciando alternativas para que as pessoas e as comunidades cresçam economicamente, melhorem a qualidade de vida e o bem estar. A energia é primordial para o processo de crescimento econômico, sendo um elemento importante na infraestrutura econômica, e o seu consumo mantém uma relação bem estreita com os impactos ambientais. No passado era um coadjuvante, hoje é o protagonista das estratégias empresariais e de governo.

Segundo a *United Nations for Development Programme* – UNDP (2002) é fundamental a questão energética aliada ao desenvolvimento sustentável:

*“Energy is central to sustainable development and poverty reduction efforts. It affects all aspects of development -- social, economic, and environmental - including livelihoods, access to water, agricultural productivity, health, population levels, education, and gender-related issues. None of the Millennium Development Goals (MDGs) can be met without major improvement in the quality and quantity of energy services in developing countries”.*

Se o crescimento econômico tem forte relação com o aumento do consumo de energia, o mesmo não se pode afirmar com o desenvolvimento econômico, porque exige uma análise qualitativa da questão energética. Assim as políticas energéticas, tecnológicas e ambientais traduzirão o novo modelo de desenvolvimento econômico, sendo possível acreditar que existem caminhos alternativos que tenham menos intensidade energética (COHEN, 2002, p. 245-246).

Os crescimentos rápidos e mal planejados da produção e do consumo energético levam a impactos ambientais que podem comprometer o desenvolvimento. De acordo com Feitosa (2010, p.43):

*“As transformações de energia devem [...] considerar o desafio de fornecer serviços que sejam capazes de melhorar a qualidade de vida da sociedade por meio da saúde, educação, esperança de vida e conforto, tendo em vista que uma fonte de energia segura, justa e sustentável é fundamental para o desenvolvimento econômico. As políticas energéticas podem trazer uma variedade de benefícios sociais, por meio da utilização de novas tecnologias para produção de energia, que sejam capazes de universalizar o acesso à energia adequada com serviços modernos, determinando o quantitativo de pessoas que podem potencialmente atingir um padrão mínimo de qualidade de vida no futuro”.*

Assim, como a quantidade de pessoas que tem potencial de atingir o padrão mínimo de qualidade de vida a partir do consumo de energia tem aumentado principalmente

próximo a centros urbanos dos países em desenvolvimento e que muitas vezes a rápida inclusão das pessoas neste processo faz com que este seja mal planejado. Desta forma, a questão demográfica afeta diretamente o tamanho da demanda energética<sup>33</sup> e pode também ser responsável por danos ambientais.

De acordo com os dados do *World Energy Outlook*, o aumento da população mundial está ocorrendo em áreas urbanas. A contínua e rápida urbanização dos países não pertencentes à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico – OCDE tenderá aumentar a demanda por energia, e devido a sua característica tende a ser consumida dentro ou nas proximidades dos centros urbanos.

Desta forma, estamos diante de um impasse, se por um lado para garantir um padrão mínimo de desenvolvimento é necessário um consumo energético maior, por outro esse processo não é possível sem crescimento econômico. Para tentar elucidar este dilema será analisada na próxima seção a relação existente entre crescimento econômico e consumo energético.

### **2.1.1 Crescimento econômico e intensidade energética**

Não é preciso uma análise profunda para compreender que exista uma forte correlação entre crescimento econômico e consumo de energia. Porém a grande dificuldade é a quantificação desta relação. Os modelos econométricos que tratavam deste assunto até o início da década de 1960 foram unânimes em afirmar que havia um único padrão na relação entre aumento do consumo energético e o crescimento econômico, expresso através de uma elasticidade-renda próximo de um. Este modelo estabelece que todos os países sem distinção possuíam a mesma elasticidade e seguiam a mesma trajetória (Pinto Junior, 2007, pp. 25-30).

Darmstadter (1971 apud PINTO JUNIOR, 2007, p. 30) constatou que realmente havia uma relação entre PIB e consumo energético, porém havia dispersões que deviam ser analisadas. Com isso, concluiu que a renda *per capita* era uma variável explicativa para o consumo *per capita* de energia, desta forma seu modelo chegou a seguinte equação:

---

<sup>33</sup> O estilo de vida moderno está cada vez mais dependente da energia para satisfazer suas necessidades de transporte, lazer e material.

$$\log\left(\frac{E}{P}\right) = \alpha + \beta \left(\frac{Y}{P}\right)$$

Onde E/P é o consumo de energia *per capita* (“E” é a energia contabilizada em toneladas equivalente de carvão, “P” representa a população em numero de habitantes) e Y/P a renda *per capita*. Janosi e Grayson (1971 apud PINTO JUNIOR, 2007, p.30) contribuíram com o modelo econométrico estabelecendo a relação entre crescimento do PIB e aumento do consumo de energia de trinta países entre os anos de 1953 a 1965, coma seguinte formulação:

$$\log E = \alpha + \beta PIB$$

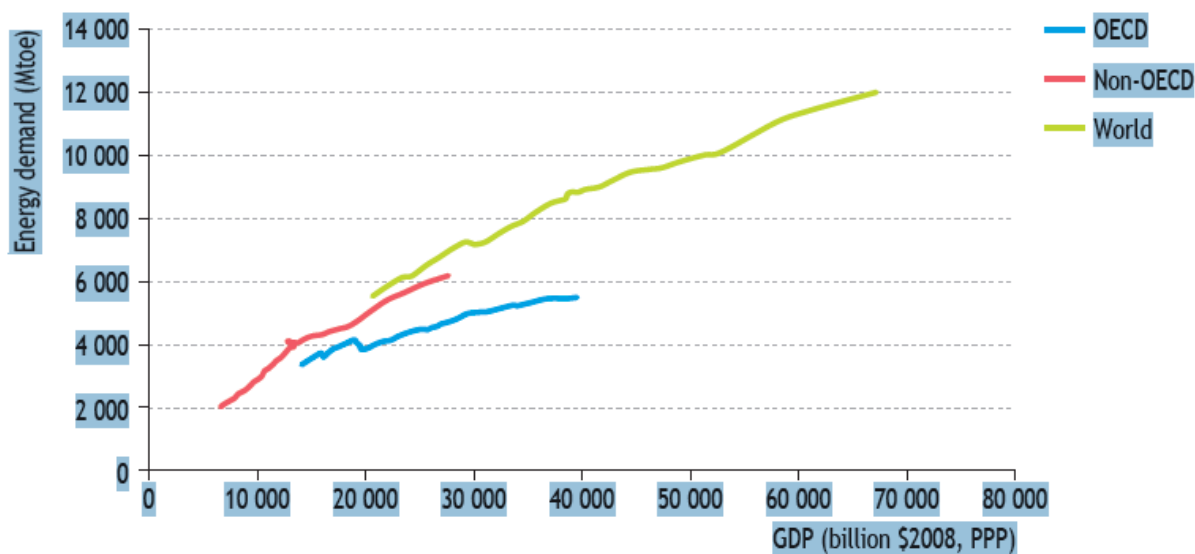
Com estes trabalhos foi confirmada a forte relação entre crescimento econômico e consumo energético, embora a elasticidade fosse diferente para cada país. Assim os países com maior participação industrial no PIB possuíam uma elasticidade maior, enquanto que os países com forte presença do setor agrícola acontecia o inverso (PINTO JUNIOR, 2007, p. 31).

Assim uma medida de eficiência energética de uma nação seria a sua intensidade energética que seria calculado por uma unidade de energia primária por unidade do PIB. Essa intensidade energética tende ao declínio na maioria dos países em um espaço de tempo considerável, mesmo existindo uma limitação tecnológica para essa queda.

Cabe destacar que este indicador possui problemas. Primeiro por não apresentar de qual fonte energética foi disponibilizada a energia, assim uma matriz energética eficiente do ponto de vista do consumo, não é necessariamente eficiente do ponto de vista ambiental. Outro problema é a utilização do PIB, já que com a globalização da economia muitos países utilizam os recursos e os serviços ambientais fora da sua fronteira através do comércio internacional (COHEN, 2002, pp. 131-132).

Conforme comprova o gráfico 3, existe uma relação entre PIB e demanda por energia primária. Assim, percebe-se que a demanda primária aumentou linearmente junto com o PIB entre os anos de 1971 a 2007. Enquanto o PIB aumentava 1% o consumo de energia primária aumentava 0,7%(IEA, 2009, p. 59).





**GRÁFICO 3 - DEMANDA POR ENERGIA PRIMÁRIA E PIB ENTRE OS ANOS DE 1971 A 2007**

Fonte: IEA, 2009, p. 59.

Essa elasticidade renda da demanda por energia primária era de 0,8 em 1970 reduziu para 0,5 em 1990 e novamente voltou a subir para 0,7 entre os anos de 2000 e 2007. Segundo a IEA (2009, p.59) uma das explicações para esse aumento foi o aumento da intensidade energética da China, que possui forte participação dos combustíveis fósseis em sua matriz energética.

Segundo os estudos de Markandya, Pedroso-Galinato e Streimikiene (2006) que investigou a intensidade energética de doze nações do Leste Europeu para o período de 2000 a 2020, percebeu que há uma conversão dos níveis para o padrão da União Europeia. Porém a demanda real de energia durante esse mesmo período é crescente, mesmo com a redução da intensidade energética. Desta forma, os autores concluem que não é possível alcançar a sustentabilidade das emissões levando em consideração os níveis totais de consumo de energia. Portanto, o indicador de intensidade energética embora possa apresentar uma tendência de queda, sua avaliação tem que considerar o consumo total de energia.

Devido a esta forte relação entre crescimento econômico e emissão de carbono, houve uma reinterpretação do “crescimento zero” e do “*steady state*” que foram expostos na primeira seção deste capítulo, assim ressurgiu teses que advogam a favor destas idéias. Dentre as formas de abordagem Huetting (2010 apud FEITOSA, 2010, p. 47) entende que para se alcançar a sustentabilidade ambiental é preciso diminuir a produção, tendo em vista que a Terra está ameaçada por um crescimento

mal formulado. Nesta mesma linha Schneider, Kallis e Martinez-Alier (2010) esclarecem que o crescimento econômico não é sustentável e que o progresso da humanidade sem o crescimento econômico é viável, assim eles definem o “decrecimento sustentável”:

*An equitable downscaling of production and consumption that increases human well-being and enhances ecological conditions at the local and global level, in the short and long term (SCHNEIDER; KALLIS; MARTINEZ-ALIER, 2010).*

Esta transição deve ser harmoniosa, equitativa e voluntária. Segundo os autores, estas são condições para que se chegue a um regime de produção e consumo baixos. Por esta interpretação as chances para alcançar a sustentabilidade aumentam significativamente, haja vista que se forem operadas por uma decisão coletiva e democrática trará melhores resultados do que a imposição de uma crise econômica.

Entretanto para que este modelo funcione, os países que já possuem um alto grau de desenvolvimento tem que dispensar o crescimento econômico. Neste sentido já existem duas publicações com esta sinalização: o relatório *Prosperity without Growth?* da Comissão de Desenvolvimento Sustentável do Governo Britânico e o segundo é o livro do professor Peter Victor, da Universidade de York no Canadá, intitulado *Without Growth: Slower by Design, not Disaster*.

Essas teses favoráveis ao decrecimento parte da premissa de que o modelo atual de crescimento econômico capitalista é desigual e excludente, inclusive no acesso a energia, desta forma só poderá superar este quadro com a promoção do crescimento. Assim, mesmo que nem todo crescimento se traduza em desenvolvimento, toda a forma de desenvolvimento requer crescimento.

As idéias de desenvolvimento sem crescimento apresentam dois equívocos: primeiro é a confusão provocada entre crescimento econômico e crescimento do consumo material. O segundo é não analisar o fato de que não pode haver desenvolvimento sem crescimento. Desta forma, se o desenvolvimento pode ser sustentável, isso quer dizer que o crescimento que está embutido também o pode.

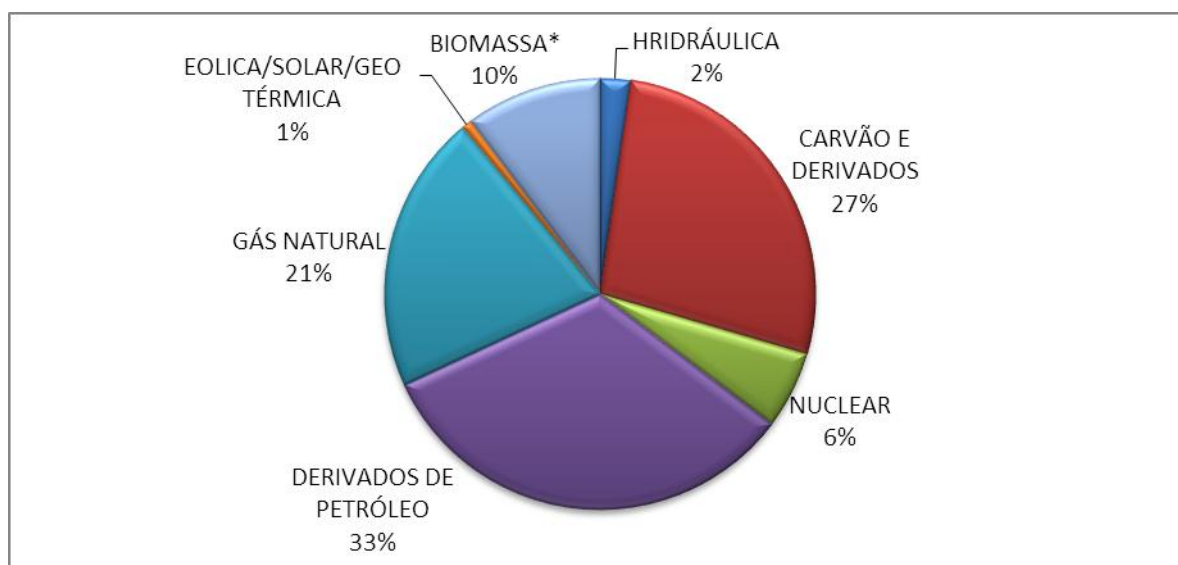
Mesmo que o crescimento seja o principal impulsionador da demanda energética, os problemas ambientais do desenvolvimento sustentável passam também pela análise da estrutura do mercado de energia que será apresentada a seguir e principalmente discutir uma transição da estrutura de oferta de energia com crescente composição

de fontes limpas e renováveis, desta forma será possível haver crescimento econômico com redução das emissões dos GEE.

### 2.1.2 A estrutura da oferta de energia no mundo

A estrutura da matriz energética tem estreita relação com o problema das mudanças climáticas, pois é responsável por grande parte das emissões de poluentes na atmosfera. As fontes de energia de origem fóssil com grande potencial de emissões de carbono como o petróleo, carvão e o gás representam 81% do consumo mundial de energia.

Segundo os dados da IEA (2009), o aumento da demanda de energia do mundo irá crescer algo em torno de 1,5% ao ano entre 2007 e 2030 e os combustíveis fósseis continuarão a ser uma das principais fontes primárias de energia e corresponderão por 77% deste aumento. No gráfico 4 é apresentada a oferta de energia elétrica por fonte no mundo em 2009.



**GRÁFICO 4 - OFERTA DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTE NO MUNDO– 2009**

Fonte: (Internacional Energy Agency - IEA, 2011).

O intenso processo de crescimento econômico, através da industrialização e da urbanização nos países fora da OCDE fará com que a sua participação cresça no mercado entre 52% a 63% até 2030. Neste contexto, o principal impulso é dado por Índia e China que representam respectivamente 15% e 39% do aumento global do consumo de energia. Infelizmente, a maior parte deste aumento energético está no

carvão, e se esta fonte energética continuar a crescer neste ritmo poderá ser o principal combustível para a geração de energia no futuro próximo (IEA, 2011).

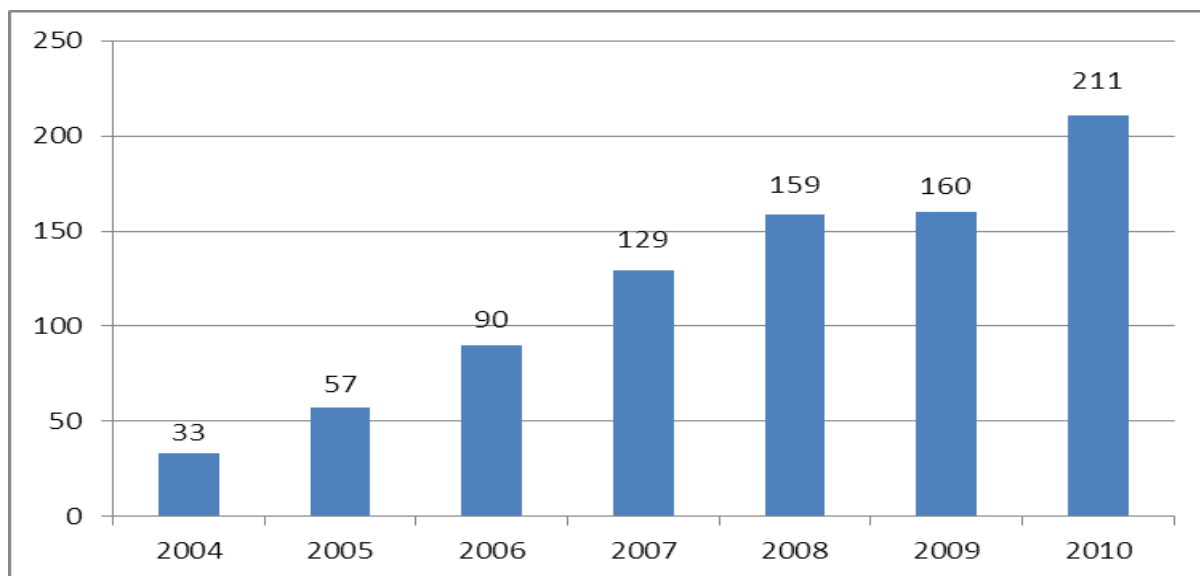
Como consequência dessa estrutura baseada em combustíveis fósseis está a acumulação dos GEE e que se trata do grande desafio da sociedade nos dias atuais. Devido à interferência humana para a geração de energia, houve um aumento na concentração dos gases que provocam o Efeito Estufa e desta forma, contribui para o aumento da temperatura média do planeta.

A utilização de combustíveis fósseis é uma das grandes responsáveis pelo aumento do efeito estufa. A concentração desses gases na atmosfera aumentou em aproximadamente 100 ppm, comparado aos níveis pré-industriais, no ano de 2005 essa concentração atingiu o valor de 379 ppm (IPCC, 2007, p. 102).

Relatório do *Fourth Assessment Report* do IPCC – 2007, afirma que entre os anos de 1900 a 2000, o consumo de energia primária no mundo aumentou mais de dez vezes e a população quatro vezes. Segundo as previsões deste relatório, nas próximas décadas haverá um crescimento considerável da demanda de energia devido às taxas de crescimento econômico, principalmente nos países em desenvolvimento.

Se for analisada a questão das emissões dos GEE setorialmente será verificado que no ano de 2004, 26% dessas emissões foram provenientes do fornecimento de energia (elétrica e aquecimento), 19% das indústrias, 14% da agricultura, 17% do desmatamento, 13% dos transportes, 8% para uso residencial, comercial e de setores de serviço e 3% dos resíduos (IPCC, 2007, p. 104).

Contudo, os investimentos realizados em energia renovável vêm aumentando gradativamente no mundo, conforme segue:



**GRÁFICO 5 - NOVOS INVESTIMENTOS EM ENERGIA RENOVÁVEL NO MUNDO ENTRE 2004 E 2010 EM BILHÕES DE DÓLARES**

Fonte UNEP, 2011, p. 211.

Sabe-se que todas as atividades humanas contribuem de alguma forma para a emissão dos GEE na atmosfera, porém o consumo de energia elétrica é um fator chave para a redução dos impactos ambientais, respondendo por aproximadamente 26% das emissões dos GEE na atmosfera em 2004, assim na próxima seção é analisado o potencial da energia renovável para o abatimento das emissões de dióxido de carbono.

### **2.1.3 Energia limpa e renovável: oportunidade de desenvolvimento econômico sem emissão de carbono.**

Segundo projeção da IEA (2011) mantendo o cenário atual, a demanda de energia primária irá crescer 1,4% ao ano até 2035 e as maiores taxas de crescimento serão verificadas em países fora da OCDE, principalmente Índia e China. A grande pergunta que se faz neste momento é como pode haver crescimento sem emissão dos GEE na atmosfera? Uma das respostas a esta pergunta é melhorar as fontes de combustível primário, investindo em energia renovável.

Pode soar estranho no primeiro momento, mas toda fonte de recurso para a geração de energia *a priori* é renovável. Isto se deve pelo motivo que mesmo os recursos

naturais como o carvão ou o petróleo podem ser renovados, porém a sua reposição requer milhões de anos de decomposição da matéria orgânica, aliado a questões de temperatura e pressão. Como este tempo é muito longo, torna-se inviável a espera de renovação deste recurso, desta forma se convencionou que essas fontes de energia seriam chamadas de não renováveis. (Cabral & Murphy, 2009).

A IEA (2011, p. 5-6) define energia renovável como:

*“Renewable energy is derived from natural processes that are replenished constantly. In its various forms, it derives directly or indirectly from the sun, or from heat generated deep within the earth. Included in the definition is energy generated from solar, wind, biomass, geothermal, hydropower and ocean resources, and biofuels and hydrogen derived from renewable resources.*

Assim a energia renovável pode ser entendida como a energia que foi originada de fontes naturais que possuem alta taxa de renovação. Embora esta afirmação possa ser redundante, ela estabelece a ligação entre as fontes de recursos e a energia, sendo sua principal vantagem a redução dos GEE. Porém isto não quer dizer que a energia renovável seja necessariamente de baixo impacto ambiental. Como exemplo pode-se citar a hidrelétrica das Três Gargantas na China, embora seja uma forma de produção de energia renovável, a área alagada para essa usina foi de 1.045Km<sup>2</sup>, ocasionando a supressão da vegetação local, além disso, a construção de barragens pode interromper o fluxo migratório dos peixes da região. Outro exemplo são as turbinas eólicas que devido à velocidade de funcionamento das pás coletoras de vento, acabam por matar os pássaros da região. Estes exemplos definem como um projeto deste tipo pode ser prejudicial ao meio ambiente.

Segundo o Portal Brasileiro de Energias Renováveis (2011), “as fontes de energia renovável são aquelas em que os recursos naturais utilizados são capazes de se regenerar, ou seja, são considerados inesgotáveis, diferente de fontes não renováveis como o petróleo”.

Entre as fontes de recursos renováveis destacam-se o sol, o vento, a chuva, as marés, a geotérmica e a hídrica. Na verdade, praticamente todas as fontes de energia renovável conhecidas provêm do sol, isso porque os ventos são resultados do aquecimento da superfície da Terra que geram diferença de pressão e assim ocasionam os ventos. As chuvas que enchem os leitos dos rios para a geração de energia hidráulica é formada a partir da evaporação da água ocasionada pelo sol entre outras que são direta ou indiretamente afetadas pela incidência da radiação

solar.

No quadro 7 é destacada as principais fontes de geração de energia limpa e renovável.

<b>Fontes de geração de energia limpa e renovável</b>	<b>Descrição</b>
Hidráulica	A partir da força da queda d'água (energia cinética) faz-se girar uma turbina, transformando em energia elétrica.
Biomassa	Parte da transformação de produtos de origem animal e vegetal para a produção de energia. Por exemplo, os biocombustíveis e a lenha.
Solar	A energia solar pode ser captada por painéis ou coletores solares que a convertem em energia elétrica ou térmica. Com os coletores a luz solar é coletada e se transforma em energia térmica, podendo ser utilizada no aquecimento de água residencial, ao até mesmo no acionamento de uma turbina para a geração de energia elétrica, ou através de painéis fotovoltaicos serem transformada diretamente em energia elétrica.
Eólica	É a transformação da energia cinética presente nos ventos que pode ser aproveitada para girar uma turbina e gerar energia elétrica, ou para realizar pequenos trabalhos como a moagem de milho ou bombeamento da água do subsolo.
Geotérmica	É a energia presente no interior da Terra e consiste em aproveitar as águas quentes e o vapor para a geração de eletricidade
Maremotriz	É a energia advinda dos movimentos das ondas formando as marés, causando pequenas variações de altura que podem ser captadas através de turbinas hidráulicas e transformadas em energia elétrica.
Hidrogênio	Energia do hidrogênio é a energia que se obtém da combinação do hidrogênio com o oxigênio produzindo vapor de água e energia em forma de eletricidade

#### **QUADRO 7 - PRINCIPAIS FONTES PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA SUSTENTÁVEL**

Fonte: (Cabral & Murphy, 2009).

Embora existam várias fontes de energia a partir de fontes renováveis, elas são geralmente muito difusas na superfície da Terra, desta forma existem locais que possuem grande capacidade para geração de energia a partir destas fontes e em outras localidades esta capacidade é muito limitada.

Um reflexo disto é que os níveis de produção de energia a partir de fontes renováveis em 2009 alcançaram somente 13% do consumo mundial de energia, sendo: 10% de biomassa, que são utilizadas principalmente no aquecimento de residências; 2% de energia hidráulica; e 1% de novas fontes de geração de energia (pequenas hidrelétricas, eólica, solar, geotérmica e biocombustível).

Enquanto isso, o Brasil que possui um enorme potencial de geração de energia hidráulica detém quase 50% da sua oferta de energia primária oriunda de fontes renováveis, e desse total 13,7% são oriundas das hidrelétricas, 19,3% do produto da cana 10,3% da lenha e 4,3% de outras fontes renováveis. Sabe-se que outros países não possuem uma capacidade de produção tão elevada quanto o Brasil (BRASIL, 2011, p. 16).

Segundo o relatório do UNEP (2011, p. 206-209), a comunidade mundial e os governos nacionais se deparam com quatro grandes desafios no setor energético: 1) A segurança energética; 2) as mudanças climáticas; 3) a poluição e os riscos à saúde pública, e; 4) A inclusão energética. Neste sentido tornar a “economia verde” no setor energético inclui o aumento substancial dos investimentos em energias limpas e renováveis, oferecendo uma oportunidade para enfrentar estes desafios.

A utilização do hidrogênio como combustível poderá contribuir para a superação destes desafios. Como o hidrogênio pode ser produzido por várias fontes, contribuirá para inserir várias comunidades que não possuíam energia e aumentar a segurança energética. Além disso, a utilização do hidrogênio não gera grandes problemas com poluição e nem emite os GEE, garantindo uma saúde pública melhor e a redução da poluição.

Desta forma a busca pela sustentabilidade do desenvolvimento e do “esverdeamento” do setor energético requer uma forma diferente da atual, que é, baseada nos combustíveis fósseis, para uma nova que seja baseada nas fontes limpas e renováveis. A matriz energética baseada em fontes limpas e renováveis é um fator chave para a redução dos impactos ambientais causados pela ação



antrópica e a sua busca poderá mitigar os impactos decorrentes da emissão de gases do efeito estufa na atmosfera, assim na próxima seção será analisado um exemplo prático para a promoção da “economia verde”, o uso do hidrogênio para a geração de energia.

## 2.2 PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO HIDROGÊNIO - SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS EXISTENTES E EM DESENVOLVIMENTO

Segundo cientistas da Universidade da Columbia<sup>34</sup>, o hidrogênio é o elemento químico mais abundante do Universo conhecido, constituindo aproximadamente 75% da massa e 90% dos átomos<sup>35</sup>. Encontra-se em abundância nas estrelas e nos planetas gigantes gasosos, entretanto, na atmosfera terrestre é encontrado numa quantidade pequena, aproximadamente de 1 ppm (parte por milhão) em volume (Gomes Neto, 2005, p. 87).

Embora o hidrogênio em sua forma livre não seja a mais abundante da atmosfera terrestre, ele se encontra associado a inúmeros compostos, como a água e compostos orgânicos (incluindo todas as formas de vida conhecidas na Terra), os combustíveis fósseis e o gás natural (Gomes Neto, 2005, p. 87).

Em linha com este pensamento Santos & Santos (2005, p. 254) argumenta:

“O hidrogênio é o elemento químico mais abundante no Universo e o mais leve, sendo também o mais simples da tabela periódica de Mendeleiev. É conhecido desde há centenas de anos como um gás que se obtém quando o ácido sulfúrico diluído é posto em contato com o ferro, sendo inflamável no ar”.

O hidrogênio é o elemento químico mais leve conhecido. Nas condições normais de pressão e temperatura forma um gás diatômico, ou seja, com dois átomos, representado pelo símbolo  $H_2$ . Nesta composição possui um ponto de ebulição, que é a passagem do estado líquido para o gasoso, de  $-252,88\text{ }^{\circ}\text{C}$ , e um ponto de fusão, ou seja, o ponto em que a substância passa do estado sólido para o líquido, de  $-259,13\text{ }^{\circ}\text{C}$  (NEVES, CORRÊA, & CARDOSO, 2008, p. 52).

<sup>34</sup>(The Columbia Encyclopedia, 2001)

<sup>35</sup>(Rangel Junior, 2006) em sua pesquisa também chega aos mesmos percentuais da Universidade da Columbia.

Além destas características, o hidrogênio é incolor, inodoro, atóxico, insípido, insolúvel em água e altamente inflamável. Esta última característica é bastante útil para a utilização desta substância como combustível, já que ele é tão instável que reage com o oxigênio da atmosfera liberando uma grande quantidade de energia, sendo um importante vetor para a geração de energia (NEVES, CORRÊA, & CARDOSO, 2008, p. 52).

Destaca-se o fato de que a energia liberada na combustão do hidrogênio é aproximadamente duas vezes e meia maior que a energia liberada dos hidrocarbonetos (gasolina, gasóleos, metanos, propanos, entre outros), e como o hidrogênio é mais leve, a explosão do gás de hidrogênio é mais destrutiva e mais rápida que dos hidrocarbonetos, conforme comparativo da tabela abaixo (SANTOS & SANTOS, 2005, p. 253).

**TABELA 1 – PODER CALORÍFICO DE DIFERENTES COMBUSTÍVEIS**

<b>Combustível</b>	<b>Valor do Poder Calorífico Superior (a 25°C e 1atm)</b>	<b>Valor do Poder Calorífico Inferior (a 25°C e 1atm)</b>
Hidrogênio	141,86 KJ/g	119,93 KJ/g
Metano	55,53 KJ/g	50,02 KJ/g
Propano	50,36 KJ/g	45,6 KJ/g
Gasolina	47,5 KJ/g	44,5 KJ/g
Gasóleo	44,8 KJ/g	42,5 KJ/g
Carvão	33,49 KJ/g	27,21 KJ/g
Metanol	19,96 KJ/g	18,05 KJ/g

Fonte: (Santos & Santos, 2005, p. 253)

Ademais, pode-se observar que nos últimos anos houve um aumento do número de especialistas que relacionam as emissões dos gases do efeito estufa (por exemplo, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>) com o aquecimento global. Além disso, a redução das reservas de petróleo, responsáveis por quase a totalidade das fontes de geração de energia no mundo, estão se esgotando e seus preços estão cada vez mais elevados. Diante

destes fatores, a utilização de fontes renováveis de energia está sendo incentivada em todo o mundo (CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010).

Além da busca de fontes de energia limpa e renovável, “a aplicação das tecnologias do hidrogênio é considerada por muitos especialistas como uma alternativa à utilização dos atuais combustíveis fósseis nos transportes” (CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010, p. 10), este cenário leva em consideração que esta aplicação apresenta baixos impactos ambientais, e que nas grandes metrópoles tenderá a contribuir para a redução dos níveis de poluição atmosférica.

Segundo (BOTO, 2007), estima-se que haja cerca de 750 milhões de veículos no mundo que são alimentados por derivados de petróleo e a perspectiva é que o número de veículos dobre nos próximos vinte anos. Se levado em consideração que os gases emitidos por esses veículos são responsáveis por cerca de 17% das emissões de dióxido de carbono no planeta, um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa, a previsão é que os níveis de emissões de dióxido de carbono na atmosfera tendem a aumentar se nada for feito com relação a esta situação.

A utilização do hidrogênio como vetor energético a partir de vários insumos e processos diversificados o coloca como um elemento de integração entre diversas tecnologias existentes e que poderão existir, conforme ilustrado na figura 4.

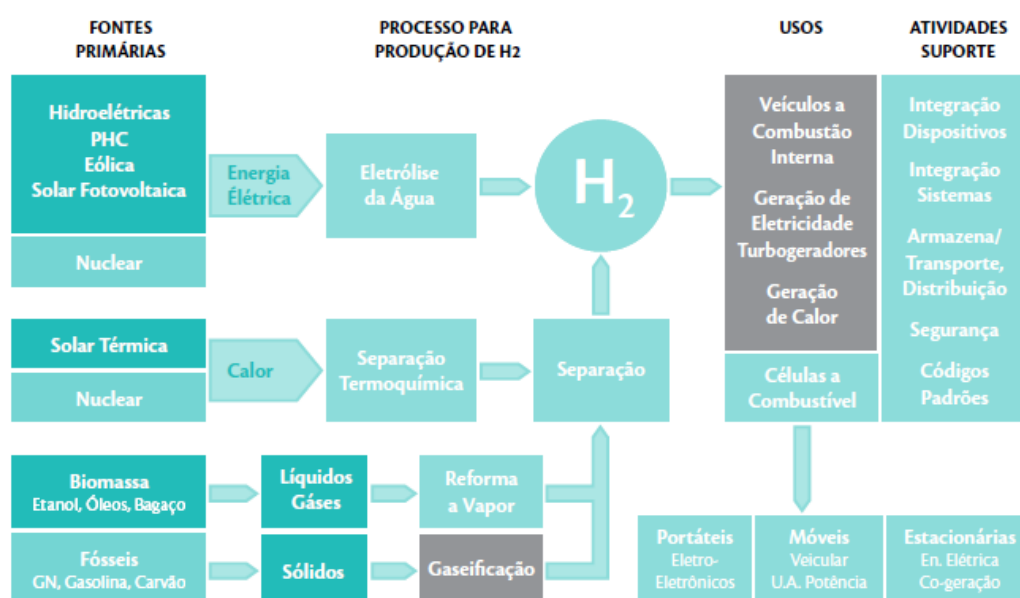


Figura 4 - Possíveis rotas para a produção e utilização do hidrogênio como vetor energético

Fonte: CENEH, apud (CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010, p. 11)

Essa característica da utilização do hidrogênio como vetor energético a partir de diversos insumos, faz surgir à expectativa de reduzir a dependência dos produtores de petróleo, e poderia dar início à geração democrática de energia distributiva<sup>36</sup>. (RIFKIN, 2003, p. 230)

“... com a geração distributiva toda família, empresa, bairro e comunidade no mundo tornam-se potencialmente tanto produtor como consumidor e podem vender seu próprio hidrogênio e eletricidade. Como as células combustíveis se localizam geograficamente nos locais em que o hidrogênio e a eletricidade devem ser produzidos e parcialmente consumidos, com o excedente de hidrogênio sendo vendido como combustível e o de eletricidade sendo reenviada para a rede de energia, a capacidade dos produtores-usuários de se agregarem em grandes quantidades, formando associações, será fundamental para que a posse da energia se estabeleça e o ideal da energia democrática progrida” (RIFKIN, 2003, p. 230).

Embora este processo a primeira vista pareça distante, os movimentos em busca da utilização deste vetor energético estão em andamento tanto no Brasil como no mundo, e as novas tecnologias estão sendo desenvolvidas para a obtenção, transporte e armazenagem do hidrogênio.

### 2.2.1 Como obter o hidrogênio

Para iniciar este tópico é importante entender que as fontes de energias primárias, também conhecidas por fontes de energia natural são aquelas que existem livremente na natureza e podem gerar energia de forma direta, sendo subdividida em renovável (solar, eólica, Biomassas, hídrica, oceânicas, geotérmicas), não renovável (carvão mineral, petróleo e gás natural) e nuclear<sup>37</sup>. Já as fontes de energia secundária, como a energia elétrica, não existem prontas na natureza para serem utilizadas de forma direta, precisando ser produzidas, sendo sua principal utilização no consumo final (FOSTER, ARAÚJO, & SILVA, 2005, p. 755).

Utilizando-se deste conceito, o hidrogênio não pode ser caracterizado como uma fonte de energia primária porque para obtê-lo é necessário extraí-lo da sua fonte de origem, já que ele quase sempre está associado a outros elementos químicos e este

---

<sup>36</sup> Em seu livro, Rifkin compara a evolução da geração distributiva com o desenvolvimento da internet, em que os usuários são ao mesmo tempo produtores e consumidores de conteúdo, garantindo em sua visão uma forma mais democrática de acesso a energia.

<sup>37</sup> A UNEP trata a energia nuclear como sendo fonte de energia renovável, porém esta dissertação não corrobora com esta afirmação, por isso foi apresentada a parte.

processo de separação, como qualquer fonte de energia secundária, gera perdas de energia. Portanto, o hidrogênio constitui-se de uma fonte de energia secundária que precisa ser produzida, tal qual a eletricidade (FOSTER, ARAÚJO, & SILVA, 2005, p. 755).

Na realidade até mesmo o petróleo e o carvão mineral precisam de certa quantidade de energia para sua extração e uso, e quanto mais escasso se torna o recurso natural, maiores tendem a serem os custos para extraí-lo. Embora sempre tenha existido petróleo no fundo do mar, sua extração em larga escala só se deu recentemente, uma vez que as fontes mais próximas à superfície estão se esgotando, desta forma, abriu-se caminho para novas tecnologias de extração e maiores gastos também, que se traduz em um aumento do valor final deste recurso. Este é só um exemplo de como a escassez do recurso altera seu preço final.

Neste contexto, o hidrogênio se torna mais vantajoso que as fontes de energia de origem fóssil porque está presente em quase todo o mundo através da água e das substâncias orgânicas, e seu processo de obtenção é diversificado, podendo ser combinado com fontes primárias de geração de energia renovável (FOSTER, ARAÚJO, & SILVA, 2005, p. 756).

O processo de produção de hidrogênio com a tecnologia atual utiliza mais energia para a obtenção do que a proveniente do uso do hidrogênio, ou seja, há perda de energia na utilização do hidrogênio, porém as vantagens advindas com sua utilização pode tornar esta fonte de energia promissora, assim como o desenvolvimento de melhores tecnologias para a sua obtenção (FOSTER, ARAÚJO, & SILVA, 2005, p. 755).

Todos os métodos atuais de produção de hidrogênio têm como base a separação deste das matérias-primas que o contêm. Desta forma, a matéria prima utilizada no processo é que dita o método de separação que deve ser aplicado. (Universidade dos Açores, 2011)

Dentre estes processos, a tecnologia dominante para a obtenção de hidrogênio é através da reação de vapor de alta temperatura com carvão ou gás natural, dois combustíveis fósseis que se vão esgotar um dia. Estas reações para além de produzirem hidrogênio também produzem dióxido de carbono, um gás que contribui para o aquecimento global (Universidade dos Açores, 2011).

Porém, quando é necessário obter hidrogênio com maior grau de pureza, recorre-se à eletrólise, onde o hidrogênio é produzido a partir da água. Neste processo, uma corrente elétrica passa pela água e, na presença de eletrodos permite a separação da água em oxigênio e hidrogênio, sem qualquer emissão de gases poluentes. A obtenção de hidrogênio por eletrólise da água é uma alternativa viável e limpa à atual tecnologia dominante. No entanto, o custo com a utilização da eletricidade é maior do que a gerada a partir de combustíveis fósseis. (Universidade dos Açores, 2011)

No quadro 8, é possível visualizar os processos mais relevantes na obtenção do hidrogênio, bem como a matéria prima utilizada, a energia utilizada para a produção e as substâncias emitidas pelo processo.

MÉTODO	PROCESSO	MATÉRIA-PRIMA	ENERGIA	EMISSIONES
<b>TÉRMICO</b>	Reformação	Gás Natural	Vapor a alta temperatura	Dióxido de Carbono
	Hidrólise termoquímica	Água	Calor proveniente da energia nuclear	Sem emissões
	Gasificação	Carvão, biomassa	Vapor, oxigênio, calor e pressão.	Algumas emissões
	Pirólise	Biomassa	Vapor a temperatura média	Algumas emissões
<b>ELÉTRICO</b>	Eletrólise	Água	Eletricidade	Consoante à energia primária utilizada
	Foto eletroquímica	Água	Luz Solar	Sem emissões
<b>BIOLÓGICO</b>	Fotobiológico	Água e algas	Luz solar	Sem emissões
	Digestão anaeróbia	Biomassa	Calor	Sem emissões
	Fermentação	Biomassa	Calor	Algumas emissões

#### **QUADRO 8 - OS PROCESSOS MAIS RELEVANTES NA PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO**

Fonte: (Universidade dos Açores, 2011)

O processo de obtenção do hidrogênio combustível além de possuir uma íntima ligação com a matéria prima utilizada deve possuir também com a sua utilização. Desta maneira, a produção centralizada ou descentralizada deve se levar em conta a sua utilização, a matéria prima e a tecnologia existente. Assim, na próxima seção serão mostradas as formas de utilização do hidrogênio como fonte de geração de energia.

### **2.2.2 Hidrogênio como fonte de geração de energia.**

A utilização do hidrogênio como fonte de geração de energia do ponto de vista ambiental é bastante promissor, uma vez que sua utilização como combustível libera somente água, que em princípio poderia ser descartado sem maiores preocupações, transformando-se em uma fonte de geração de energia não poluente, além de se tratar do elemento químico mais abundante na natureza (DIAS, 2002).

Nesta perspectiva, a principal vantagem da utilização do hidrogênio é que o subproduto da queima é somente água, ou seja, não emite dióxido de carbono na atmosfera configurando-se como uma fonte de obtenção de energia limpa, reduzindo a poluição e o efeito estufa (FOSTER, ARAÚJO, & SILVA, 2005).

Nos grandes centros urbanos, onde os problemas com a poluição são responsáveis por diversas doenças respiratórias, a utilização de fontes de energia mais limpa garantirá à população uma melhor qualidade de vida. Cidades como São Paulo e Cidade do México que possuem elevados índices de doenças respiratórias podem vir melhorar a qualidade do ar no seu centro urbano, se o hidrogênio vier a ser adotado como vetor energético, em substituição mesmo que parcial dos derivados do petróleo.

Segundo o órgão assessor do Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio do Brasil, outro importante motivador para a mudança paradigmática do setor energético rumo ao hidrogênio é a segurança energética, uma vez que a possibilidade de obtenção de várias fontes permite utilizar as fontes locais, diminuindo ou até mesmo evitando a importação de energia (CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010).

Neste sentido completa Rifkin:

“Os geólogos podem discordar quanto à data exata em que a produção global de petróleo deve atingir o pico, mas concordam em que dois terços das reservas petrolíferas remanescentes no globo após o pico da produção estarão no Oriente Médio... o domínio sobre o petróleo regressará à região nos próximos anos. E, quando o fizer, aqueles que exercerem o poder estarão na posição de ditar os termos do mercado mundial do produto, simplesmente porque não haverá outras fontes de petróleo bruto em grandes quantidades” (RIFKIN, 2003, p. 123).

No mundo de hoje, os combustíveis fósseis são controlados por poucas Nações, e a maioria destes países fazem parte de um cartel mundial chamada de Organização dos Países Exportadores de Petróleo – OPEP. Esta organização opera desde a década de 70 do século passado, estipulando preços do petróleo via restrição de oferta. É claro que outros países passaram a produzir petróleo, porém a maior parte das reservas de petróleo mundial se encontra embaixo das terras dos países membros da OPEP (RIFKIN, 2003, p. 123).

Mesmo que haja enormes descobertas de petróleo no mundo, o fenômeno da escassez não vai deixar de acontecer porque esses recursos são limitados. Rifkin (2003, p.123) afirma que após o pico da produção de petróleo, a maior parte das reservas estará no Oriente Médio, porém nos últimos anos têm-se descoberto vários campos de produção de petróleo no mundo, principalmente nas camadas mais profundas do solo e do mar, assim se torna cada vez mais difícil prever onde o petróleo acabará por último.

Existe atualmente grande interesse na utilização do hidrogênio como fonte energética nas aplicações veiculares e na geração distribuída de eletricidade. Porém a aplicação veicular possui vantagem, devido à maior eficiência deste sistema, alcançado pela tecnologia de células a combustível e motor elétrico, e principalmente emissões locais nulas (CGEE, 2010, p. 11).

Com relação à geração distribuída existem várias tecnologias disponíveis para várias faixas de potências, porém a diferença importante entre elas é a qualidade do insumo usado para a geração. (CGEE, 2010, p. 11)

Embora a energia cedida pelo hidrogênio seja inferior à energia necessária para a sua produção, ele pode se tornar vantajoso quando associado à geração de energia primária com vales e picos de produção.

Por exemplo, o caso da geração de energia hídrica que em alguns períodos do ano há um aumento do volume de chuvas e seu potencial não é aproveitado plenamente,



uma vez que o consumo não apresenta grandes variações, fazendo com que algumas turbinas se encontrem subutilizadas. Estas Turbinas poderiam ser utilizadas à plena carga gerando excedente de energia, que efetuariam a eletrólise da água, produzindo e armazenando energia em forma de hidrogênio, já que a armazenagem de eletricidade em grandes quantidades é mais difícil (DIAS, 2002, p. 85).

Porém, para a utilização do hidrogênio como vetor energético é necessário a utilização de células a combustível para transformar o combustível em energia elétrica e assim poder ser aproveitado. Com isso, para dar continuidade será apresentado a seguir o funcionamento das células a combustível de hidrogênio.

### **2.2.3 Células a combustível de hidrogênio**

As células a combustível são capazes de transformar o hidrogênio diretamente em energia elétrica. Desta forma, estas células poderão ser utilizadas em várias aplicações e em diferentes tamanhos de planta, como na geração de energia elétrica para as residências, indústrias e empresas, podendo ser gerada em cada unidade ou de forma centralizada. Pode ser também aplicada em veículos associados a motores elétricos, além da aplicação móvel como celular, *laptops* e *tablets*.

#### **I. História das células a combustível a hidrogênio**

Apesar das células a combustível de hidrogênio estarem associadas às tecnologias modernas, elas foram descobertas há mais de 150 anos pelo advogado e cientista Willian Grove (1811-1896) quando realizava experimentos com eletrólise da água. Grove pensou que poderia reverter o processo de eletrólise, transformando hidrogênio e oxigênio em água e calor. Com este intuito em 1839 construiu a primeira célula a combustível, a qual à época denominou de bateria gasosa (DIAS, 2002, pp. 90-91).

Durante a corrida espacial, ocorrida na década de 1960, a NASA – *National Aeronautics and Space Administration*<sup>38</sup>, descobriu que para missões ao espaço superiores há quatorze dias, as células a combustíveis poderiam ser fontes de

---

<sup>38</sup>Em tradução literal significa Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica, trata-se da Agência Espacial Americana, que responde pela pesquisa, e desenvolvimento de tecnologias e programas de exploração espacial e tem como missão incrementar o futuro na pesquisa, a descoberta e a exploração espacial.

energia adequada. Por um lado as baterias não recarregáveis não duram o suficiente, e por outro os painéis fotolíticos não funcionavam quando a espaçonave se encontrava na sombra da Terra, ou seja, não possuindo luz solar para geração de energia elétrica. Devido a este interesse da NASA no desenvolvimento da célula a combustível de hidrogênio, na década de 1990 abriu-se o caminho para a renovação desta tecnologia (DIAS, 2002, p. 91).

Embora os cientistas apontassem que as primeiras aplicações civis para as células a combustível seriam nos veículos elétricos, ela vem ocorrendo primeiro nas unidades estacionárias. Segundo Dias (2002, p.91), esta inversão ocorreu por duas razões. A primeira é que existe um mercado maior para as aplicações estacionárias, e a segunda é que o setor automobilístico possui um “*lobby*” poderoso que resiste à utilização destas células, diferente da aplicação estacionária.

Dias (2002, p.91), sugere que o possível desmantelamento das grandes centrais elétricas e a desregulamentação da indústria de eletricidade em vários países na década de 1990, fará com que haja um esforço para a comercialização de células a combustível para as empresas e as residências, descentralizando a geração de energia.

Apesar de se falar basicamente de utilização em geração estacionária e veicular das células a combustível, ela pode ser usada também em aparelhos portáteis como celular, *laptops*, *tablets*, entre outros. O aumento da autonomia destes aparelhos pode chegar a até cinquenta vezes mais do que as baterias convencionais (DIAS, 2002, p. 91).

## **II. Funcionamento e aplicações das células a combustível**

As células a combustível funcionam como baterias, porém com algumas diferenças. Enquanto as baterias convencionais armazenam energia química para converter em eletricidade, as células a combustível não armazenam energia química. O princípio de funcionamento das células a combustível é de converter a energia química de um combustível em eletricidade, ou seja, há o armazenamento da substância hidrogênio que combinado com oxigênio da atmosfera produz eletricidade e água destilada (RIFKIN, 2003, p. 195).

Para a utilização das células a combustível faz-se necessário o uso de motores

elétricos que possuem vantagens em relação aos motores de combustão interna. Os motores elétricos aliados às células a combustível trabalham de forma silenciosa porque diferentemente dos motores convencionais, não há combustão interna nem partes mecânicas em movimento, ao contrário, ele utiliza corrente elétrica fornecida pela célula a combustível de hidrogênio através da reação entre o oxigênio e o hidrogênio para fazer funcionar um motor elétrico e outra parte da energia é liberada em forma de calor. (Dias, 2002, p. 92). No mesmo sentido Gomes Neto (2005, p. 93) escreve, “a célula a combustível é uma tecnologia que utiliza a combinação química entre os gases oxigênio ( $O_2$ ) e hidrogênio ( $H_2$ ) para gerar energia elétrica, energia térmica (calor) e água”.

Segundo Gomes Neto (2005, p.137), o rendimento de um motor a gasolina está na faixa de 13% a 25%, o motor a diesel fica entre 30% a 35%. Já a célula a combustível possui uma eficiência da ordem de 48% a 60%, e se aproveitado o potencial para aquecimento, o sistema poderá obter uma eficiência de até 80%. Um motor elétrico alcança um rendimento de 95%, desta forma, o conjunto célula a combustível e motor elétrico pode ter rendimento de 45% a 76%, muito superior dos motores a combustão interna.

Neste mesmo sentido Rifkin (2003, p.196) escreve:

“As células a combustível funcionam por um processo oposto ao da eletrólise. Elas não têm partes móveis, são silenciosas e são até duas vezes e meia mais eficientes que os motores de combustão interna. E os únicos efluentes são a eletricidade, o calor e a água pura destilada”.

Em seus estudos Hoffmann (2002, apud Dias 2002, p. 92) enumera cinco tipos básicos de células a combustível:

- a) Célula a combustível alcalina - possui como característica a atuação em baixas temperaturas (60-90°C), eficiência em converter energia química em eletricidade da ordem de 50% a 60%<sup>39</sup>, sendo sua principal aplicação no espaço. A desvantagem desta célula é que ela requer uma pureza muito alta do hidrogênio, podendo o  $CO_2$  degradá-lo.
- b) Célula a combustível tipo PEM (*polymer electrolyte membrane*)<sup>40</sup> – opera em

<sup>39</sup> Conforme o autor, os rendimentos apresentados são possíveis de serem atingidos do ponto de vista teórico. Na aplicação prática os valores giram em torno de 50%, e no caso de célula a combustível de alta temperatura a eficiência é da ordem de 70%, desde que se utilizem soluções de ciclo combinado.

<sup>40</sup> Membrana eletrolítica polimérica

baixas temperaturas (50-80°C), a eficiência em transformar energia química em eletricidade é da ordem de 50% a 60%. Sua melhor aplicação é para os transportes, porque entra em operação de forma mais rápida, e logo consegue produzir elevados montantes de energia.

c) Célula a combustível de ácido fosfórico – é utilizado para geração de energia estacionária, porque é operado com temperatura entre 160-220°C e uma eficiência energética em torno de 55%. Esta era a única célula disponível comercialmente até o final da década de 1990.

d) Célula a combustível de carbonatos fundidos – sua operação está associada a temperaturas elevadas (620-660°C) e eficiência em torno de 60% a 65%. É utilizado na produção de eletricidade, permitindo ainda que as altas temperaturas sejam utilizadas para outras aplicações, como a climatização e para movimentar microturbinas, entre outras. Elas funcionam principalmente a gás natural

e) Célula a combustível de óxido sólido – são as células que funcionam com a temperatura mais elevada, em torno de 800-1000°C, sua eficiência em transformar energia química em elétrica é da ordem de 55% a 65%, e também são indicadas para a produção de eletricidade e funcionam a gás natural.

Embora fossem apresentados estes tipos básicos de célula a combustível, existem outros que são menos utilizados e algumas outras que podem ser consideradas variedades destas. Contudo, a utilização de nanotecnologia<sup>41</sup> pode vir beneficiar a evolução das células a combustível, aumentando sua eficiência e reduzindo o seu tamanho, principalmente os nanotubos de carbono (DIAS, 2002, p. 93).

Os nanotubos de carbono consistem em uma estrutura tubular oca. O diâmetro destes tubos encontra-se na faixa de dois a cinquenta nanômetros. Além disto, este material possui propriedades elétricas e mecânicas que merecem destaque. Primeiro, é um dos materiais mais resistentes já descoberto, podendo ser até cem vezes mais forte que o aço carbono, aliado a isto é uma estrutura que possui uma menor área específica, ou seja, ocupa menos espaço, o que em algumas aplicações é primordial (HERMES, 2010, pp. 17-18).

---

<sup>41</sup>A nanotecnologia é a capacidade potencial de criar coisas a partir do átomo e das moléculas, usando as técnicas e ferramentas adequadas para colocar estas no lugar desejado, assim é capaz de criar estruturas microscópicas (Riboldi, 2009, p. 3-4).

Além disso, em experimentos recentes foi constatado que os nanotubos de carbono possuem características de condutores ou semicondutores de eletricidade, dependendo da configuração dos átomos de carbono (HERMES, 2010, p. 18).

Conforme Rifkin (2003, p. 196), “células combustíveis alimentadas por hidrogênio podem produzir eletricidade o bastante para atender às necessidades humanas por muito tempo no futuro”. A passagem da era dos combustíveis fósseis para o hidrogênio não será fácil, os custos destas células ainda estão muito elevados, devido ao fato que sua produção ainda não atingiu o ponto em que a economia de escala reduza os custos destes equipamentos.

De acordo com Gomes Neto (2005), para que o sistema de célula a combustível seja competitivo para o setor automotivo, o custo deste sistema deve ser de 50 dólares por KW. No ano de 2003 este custo estava em 270 dólares por KW para uma produção estimada de 500 mil veículos por ano. Já no ano de 2005 o custo estimado foi de 110 dólares por KW. Como se pode perceber o custo para a utilização desta tecnologia está em queda, enquanto que os custos relacionados com os combustíveis fósseis estão aumentando. Desta maneira é possível identificar um cenário em que o hidrogênio energético tem bons prospectos de aumento progressivo de seu uso na matriz energética global.

**TABELA 2 - PREÇOS ESTIMADOS PARA VIABILIDADE COMERCIAL DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL**

<b>APLICAÇÃO</b>	<b>PREÇO EM 2010 (DÓLAR)</b>	<b>PREÇO IDEAL PARA VIABILIDADE COMERCIAL (DÓLAR)</b>
Transportes	\$ 66 por KW	\$ 50 por KW
Residencial	\$ 700 por KW	\$ 300 a \$ 500 por KW
Centros comerciais, hotéis, hospitais	\$ 3.700 a \$ 4.500 por KW	\$ 1.200 a \$ 3.000 por KW
Estações de energia	\$ 1.125 a \$ 1.800 por KW	\$ 1.000 a \$ 1.500 por KW

Fontes: IPHE (2011<sup>a</sup>), IPHE (2011b) e (Gomes Neto, 2005), elaboração própria

Diante destas tecnologias, não se pode afirmar se algumas delas se sobressairão sobre as outras, pelo contrário, o mais provável é que estes diferentes tipos de célula sejam construídos e desenvolvidos para diferentes tipos de aplicação, tanto

para aplicação estacionária (residências, empresas e centrais elétricas) como aplicações móveis (automóveis, celular, laptops) (DIAS, 2002, p. 93).

### **III. Veículos movidos a células a combustível**

Os veículos que utilizam célula a combustível são movidos por um motor elétrico. Na verdade, as células a combustível combinam o hidrogênio e o oxigênio para gerar diretamente energia elétrica, que por sua vez alimenta o motor elétrico e assim movimenta o automóvel. Desta forma, os veículos são praticamente pequenas usinas móveis de energia elétrica (DIAS, 2002, p. 93).

Neste sentido escreveu Rifkin (2003, p. 212):

“o próprio automóvel é uma ‘usina de força sobre rodas’, com uma capacidade generativa de 20 quilowatts<sup>42</sup>. Como o carro médio fica estacionado 96% do tempo, ele pode ser conectado, durante as horas ociosas, à residência, ao escritório ou a rede principal de eletricidade interativa, provendo eletricidade extra para o sistema”.

Como os veículos movidos a célula a combustível não requerem combustão, os motores elétricos operam com uma eficiência maior, extraíndo mais eletricidade com a mesma quantidade de combustível. Neste sentido, a eletrônica substitui a mecânica que caracterizava os veículos com combustão interna, exigindo menos espaço e motores cada vez melhores (DIAS, 2002, p. 94).

Embora a utilização de veículos movidos com motores elétricos seja considerada menos danosa ao meio ambiente, a utilização desta enfrenta alguns obstáculos. A principal desvantagem é que estes veículos não possuem uma autonomia muito grande, para isso é necessário o desenvolvimento de tecnologia que permita que as baterias tenham maior capacidade, sem causar aumento de peso nestes veículos (DIAS, 2002, p. 94).

Para enfrentar esse problema da autonomia, a Dinamarca desenvolveu uma estratégia diferente. Ao invés de recarregar a bateria convencional (que pode demorar até seis horas), a bateria é trocada por um processo automatizado. Quando a bateria está se esgotando há um aviso no painel e o sistema integrado a um

---

<sup>42</sup> Ver Lovins (2001)

GPS<sup>43</sup> localiza o posto mais próximo, desta forma, o motorista paga pelo serviço e os robôs trocam a bateria em apenas um minuto e meio (PORTAL G1, 2010).

Dias (2002, p.94), complementa que as baterias de hoje duram em média menos de 30.000 quilômetros, importando uma frequente substituição das baterias ao longo da vida útil do veículo, tornando o custo de manutenção inviável. Além disso, não existe ainda infraestrutura suficientemente desenvolvida para abastecimento, nem para manutenção destes veículos, constituindo um obstáculo a esta solução.

Deve-se levar em conta também a fonte de origem da eletricidade, se foi produzida com fontes renováveis ou não. De fato, a utilização final como motor elétrico não libera poluição, porém se a energia foi produzida por uma fonte poluente, indiretamente a utilização do veículo foi responsável por esta poluição (DIAS, 2002, p. 94).

Comparável ao motor de combustão interna, os motores elétricos possuem um rendimento muito superior, e isto se dá por três razões. Primeira, o rendimento da transmissão elétrica beira os 100%, enquanto que a outra gira em torno de 90%, evitando assim perdas de energia. Segundo, os motores elétricos recuperam parte da energia que foi utilizada durante a frenagem. E terceiro, o próprio rendimento do motor elétrico, que gira em torno de 90-95% é em média Três vezes maior que os motores de combustão interna (máximo de 35%) (DIAS, 2002, p. 95).

Uma tecnologia que está sendo testada são os veículos híbridos, que possuem tanto um motor de combustão interna, como um motor elétrico. Desta forma, a combustão fornece a energia mecânica, enquanto o motor elétrico auxilia quando o rendimento é baixo, como por exemplo, no arranque ou acelerações mais fortes, enquanto que nas frenagens ou desacelerações é acumulada energia para ser aproveitado posteriormente, com isso o rendimento do conjunto se torna promissor (DIAS, 2002, p. 95).

Em Londres, foi introduzida em 2006 a primeira geração de ônibus híbridos. Estes ônibus são movidos por um motor a diesel e um motor elétrico, a grande diferença destes ônibus é que eles armazenam o excesso de energia elétrica e o utilizam para movimentar seu motor elétrico, inclusive a energia gerada com a frenagem do ônibus é armazenada e utilizada posteriormente. Este sistema é capaz de reduzir

---

<sup>43</sup> Global Position System (Sistema de Posicionamento Global)

em 30% o consumo de combustível, reduzir também em 30% a emissão de dióxido de carbono, em três decibéis o barulho proveniente do ônibus, além da redução de outros gases do efeito estufa (TRANSPORT FOR LONDON, 2012).

Existem atualmente em Londres 225 ônibus híbridos, sendo operado por sete companhias e por dez modelos diferentes de ônibus. De acordo com o programa híbrido a expectativa é que até o final do ano de 2012 existam em Londres 300 ônibus híbridos (TRANSPORT FOR LONDON, 2012).

Até o surgimento das células a combustível de hidrogênio, os veículos movidos com motores elétricos tinham que ser alimentados por baterias, o que os colocava em grande desvantagem aos motores de combustão interna, devido a sua autonomia e o tempo necessário para abastecimento (DIAS, 2002).

Com o surgimento das células a combustível a hidrogênio, essas desvantagens do motor elétrico são suprimidas e essas células, neste contexto, pode produzir eletricidade suficiente continuamente. Mesmo assim, a utilização de motores elétricos e células a combustível é duas a três vezes mais pesados do que o motor de combustão interna (DIAS, 2002).

Atualmente 98% da energia utilizada nos automóveis são provenientes de combustível fóssil. Neste contexto, a preferência das montadoras seria manter os veículos movidos à base dos derivados de petróleo (DIAS, 2002).

“É certo que o *lobby* dos construtores de automóveis preferiria continuar com os motores de combustão interna. No entanto, nenhum construtor automóvel estará em boa posição para competir no futuro se continuar a apostar exclusivamente em MCI<sup>44</sup>. Pressões ambientais forçaram seguramente mudanças na indústria automóvel. É cada vez mais tido como certo que a história automóvel vai ser caracterizada pela ruptura tecnológica” (DIAS, 2002, p. 96).

Em um estudo realizado pela *General Motors* dos Estados Unidos estimou que seriam necessários recursos da ordem de dez a quinze bilhões de dólares para a construção de 11.700 postos de combustíveis nos Estados Unidos. Este leva em consideração a distância de 3,2 km entre um posto e outro nos grandes aglomerados e de aproximadamente de 40 km nas principais rodovias (GORGULHO, 2011).

O estado americano da Califórnia foi um dos pioneiros para a transição para o hidrogênio. Este Estado possuía em 2010 vinte e seis postos de abastecimento de

---

<sup>44</sup> Motores de Combustão Interna.



hidrogênio, sendo este o último dado registrado. Os veículos movidos a este combustível possuem uma autonomia entre 200 a 400 km e um tempo de abastecimento de aproximadamente 5 minutos. Na cidade de *San Francisco* - Califórnia está em operação o “*Zero Emission Buses*”<sup>45</sup> – ZBus. Trata-se de um projeto de demonstração com doze ônibus que utilizam células a combustível para reduzir a emissão de gases de efeito estufa (CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2010).

Numa perspectiva transitória, é possível dotar os automóveis com reformadores de gasolina e gás natural. Desta forma, os veículos seriam abastecidos com esses combustíveis e transformados em hidrogênio e a partir desse momento ser utilizado para gerar energia elétrica para o motor elétrico. Embora esta solução não seja a melhor, já que haveria a liberação de poluição nestes tipos de combustível, é uma solução chamada por Rifkin como “dar um jeito” até que outras barreiras sejam superadas.

“Alguns estudos estimam que a criação de uma infraestrutura nacional [Estados Unidos] para produzir e distribuir hidrogênio em grandes quantidades custaria mais de 100 bilhões de dólares. A “questão hidrogênio” é o velho problema do ovo e da galinha. As empresas automobilísticas relutam em fabricar veículos com células combustíveis a hidrogênio por medo de que as companhias energéticas não invistam fundos suficientes para criar milhares de estações de reabastecimento de hidrogênio. É por isso que as companhias de automóveis estão fazendo suas apostas no desenvolvimento de veículos de células a combustível munidos de reformadores internos, capazes de converter a gasolina e o gás natural em hidrogênio. As companhias energéticas, por sua vez, receiam investir bilhões de dólares na criação de uma infraestrutura nacional de suporte a estações de reabastecimento de hidrogênio enquanto não for fabricado e vendido um número suficiente de veículos de células combustíveis a hidrogênio direto” (RIFKIN, 2003, p. 213).

Além destas dificuldades infraestruturais, ainda existem dificuldades tecnológicas. O transporte do hidrogênio, por exemplo, no que se refere a perdas de recursos energéticos, exigindo avanços tecnológicos para a produção, mas também para o armazenamento e transporte do hidrogênio.

#### **2.2.4 Como armazenar e transportar o hidrogênio**

Entre as soluções possíveis para armazenar e transportar o hidrogênio, a compressão desse gás é a que está mais desenvolvida para a aplicação em curto

---

<sup>45</sup> Ônibus com zero emissão.

prazo. Embora seja a aplicação com a tecnologia mais adiantada, ela ainda possui algumas limitações (DIAS, 2002, p. 97).

Tendo em vista que o hidrogênio é um gás muito volumoso, ele precisa ser submetido a altas taxas de compressão para poder manter uma autonomia aceitável, com isso a questão da segurança deve ser analisada, porque requer depósitos mais resistentes e conseqüentemente com custos mais elevados e mais pesados<sup>46</sup> (DIAS, 2002, p. 97).

Neste estágio tecnológico existem dois tipos de depósitos de gás hidrogênio, um feito através de fibra de carbono, que embora possa ser leve, trata-se de recipiente muito dilatável, o que inviabiliza algumas aplicações. O outro é feito de material muito grande e pesado, tornando muito difícil o encaixe, por exemplo, nos veículos (DIAS, 2002, p. 97).

Outra forma para o armazenamento do hidrogênio é sob a forma de líquido criogênico, porém este tipo de aplicação apresenta uma série de problemas (DIAS, 2002, p. 97):

- a) Quando se realiza o processo de resfriamento do hidrogênio para que este se transforme em líquido, há uma enorme perda de energia, e se esta energia utilizada foi produzida gerando poluição ambiental, este processo pode não compensar em referência as emissões de gases do efeito estufa. Esses processos consomem cerca de um terço do seu conteúdo energético, é de se esperar que o desenvolvimento tecnológico possa melhorar estes processos reduzindo os custos energéticos para a liquidação do hidrogênio;
- b) O hidrogênio líquido armazenado na forma criogênica possui uma perda por evaporação entre 3 a 4% diários, referente à perda do processo de resfriamento, mesmo quando o equipamento estiver parado;
- c) O armazenamento do hidrogênio na forma líquida requer um tanque de grandes proporções, e;
- d) Esta armazenagem requer um isolamento térmico muito eficiente, porque qualquer aumento de temperatura causa perdas de combustível.

---

<sup>46</sup> Com a tecnologia atual um aumento dos padrões de segurança, significa aumentar a quantidade de material necessário para a construção dos depósitos, porém com o desenvolvimento tecnológico pode ser capaz aumentar a resistência desses materiais sem aumentar o seu peso.

Porém, a melhor solução considerada pelos cientistas para o armazenamento do hidrogênio é a de envolvê-lo em metais de hidreto, especialmente por questões de segurança. Nesta, o hidrogênio é inserido e armazenado em uma estrutura metálica, esta estrutura absorve o hidrogênio como a esponja absorve a água<sup>47</sup> (DIAS, 2002, p. 97).

Esta solução é considerada a mais segura porque não permite que o hidrogênio derrame e desta forma não se incendie em caso de acidente. De forma simplória, o hidrogênio inserido é integrado ao material de armazenamento, assim ele não adquire nenhum volume adicional, como aconteceria com o gás ou o líquido. Desta forma, qualquer hidreto pode transportar muito mais hidrogênio para o mesmo volume (DIAS, 2002, p. 97).

Porém, os metais de hidreto possuem algumas desvantagens, a primeira é em termos de peso, já que é mais pesada do que outras soluções existentes para o transporte. A segunda é o “efeito memória” resultando em uma diminuição da capacidade de absorção ao final de alguns ciclos de recarga, igual ao que acontece com as baterias comuns. Outro problema com este método é que para extrair o hidrogênio dos hidretos é necessário altas temperaturas, podendo resultar em perda energética. Para o armazenamento em grandes quantidades, este método se mostra interessante (DIAS, 2002, pp. 97-98).

Contudo, com o desenvolvimento das nanotecnologias, principalmente o desenvolvimento de nanotubos, está se tornando realidade para o armazenamento de hidrogênio, e assim que superado os problemas de armazenamento do hidrogênio, poderá constituir um importante passo rumo à “economia verde” com o uso do hidrogênio energético (DIAS, 2002, p. 98).

Para o transporte do hidrogênio é possível ainda utilizar as tubulações já criadas para o transporte do gás natural, desta forma, o hidrogênio seria transportado na sua forma gasosa por gasodutos podendo ser transportado junto com o gás natural ou somente o hidrogênio levando das regiões produtoras para as consumidoras (SANTOS & SANTOS, 2005, p. 259).

Nestes gasodutos é preciso ter uma constante manutenção, devido ao fato que as

---

<sup>47</sup> Segundo Dias (2002), estão sendo exploradas soluções baseadas em hidretos químicos como o Carrier de hidrogênio.

moléculas de hidrogênio são muito pequenas e pequenas fendas podem dar origem a fuga deste combustível e pode reagir com o oxigênio caso entre em contato com a atmosfera, e desta forma, podendo causar uma explosão. Além disso, as moléculas de hidrogênio podem reagir com as paredes do tubo de metal, desgastando-os com o tempo até que apareçam fissuras. Para se evitar estes problemas se recorrem a vários métodos, um deles é transportá-lo com substâncias que evitam o desgaste das paredes dos tubos (SANTOS & SANTOS, 2005, p. 259).

Ainda que haja esperança que as nanotecnologias possam viabilizar a armazenagem do hidrogênio de forma mais segura e mais eficiente, a realidade mostra que sempre haverá dificuldade técnica e esta dificuldade de armazenar hidrogênio combustível acaba por contribuir que o produza a partir de combustível fóssil, ao invés de produzi-lo a partir de energias renováveis.

“Os críticos afirmam que se a indústria automobilística investir em carros de células combustíveis munidos de processadores internos capazes de converter gasolina ou metanol em hidrogênio – como usinas termoquímicas portáteis –, ela se atrelará a uma estratégia de longo prazo difícil e desnecessária, que pode custar mais de um trilhão de dólares na próxima frota de veículos” (RIFKIN, 2003, p. 213).

Este processo intermediário rumo à economia do hidrogênio pode não ser tão benéfico, uma vez que, a manutenção do consumo de combustíveis fósseis para a produção do hidrogênio pode agravar a situação ambiental. Isto porque a reforma da gasolina ou metanol para a obtenção do hidrogênio também libera os gases responsáveis pelo efeito estufa. Desta forma, esta solução intermediária pode continuar emitindo poluição por muitos anos, prejudicando toda a vida na Terra.

### **2.2.5 Produção descentralizada de energia**

À primeira vista, a tecnologia para aplicação veicular pode apresentar destacada vantagem, devido à eficiência do conjunto do motor elétrico e células a combustíveis (CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010), porém é na aplicação estacionária para a produção de energia elétrica que a tecnologia se encontra mais avançada, mesmo que a preços relativamente mais elevados. Isto se deve que diferentemente das aplicações veiculares, a estacionária não precisa de tanta tecnologia para o transporte e armazenagem do hidrogênio (DIAS, 2002, p. 98).

Após meados da década de 1990, muitos países procederam a liberalização de seus

mercados energéticos, e com isso acabaram incentivando o desenvolvimento das aplicações das células a combustível. O mercado de geração de energia estacionária está baseado no nível de produção descentralizada, podendo ser alimentada por gás natural, LPG ou hidrocarbonetos líquidos, ou diretamente pelo hidrogênio (DIAS, 2002, p. 98).

Com o aumento da demanda por energia elétrica, poderão ser criados alguns pontos de produção individual para atendimento a grandes consumidores como hospitais e grandes empresas através das células a combustível, podendo ser alimentadas pela rede de gás natural já existente (DIAS, 2002, p. 98).

Embora as unidades estacionárias possuam vários fatores a favor, entre os quais se destaca o fato de ser mais eficiente do que as melhores centrais elétricas movidas com turbina de gás (ciclo combinado, atingindo a ordem de 55% a 60% de eficiência, enquanto que os geradores de combustão interna chegam a uma eficiência máxima da ordem de 35%, sem contar que são poluentes e barulhentos), os custos relacionados à implantação continuam elevados. Além disso, há outras tecnologias como as micro turbinas a gás natural, que concorrem com estas unidades (DIAS, 2002, p. 99).

Como dito anteriormente, no caso de um gerador com combustão interna, a energia química presente no combustível é transformada em energia mecânica, através de sua explosão, desta forma, faz funcionar um gerador elétrico ou alternador, produzindo assim energia elétrica. Este processo gera como subproduto o calor da explosão, o dióxido de carbono presente nos combustíveis fósseis e água (DIAS, 2002, p. 99).

As células a combustível também geram energia elétrica a partir de energia química, porém o faz de forma mais simples, transformando a energia química presente no hidrogênio diretamente em energia elétrica, sem fazer uso da combustão interna, combinando o hidrogênio com o oxigênio, e gerando como subproduto somente vapor de água e calor que pode ser aproveitado para aquecimento, entre outras aplicações (DIAS, 2002, p. 99).

Dias (2002, p.99-100), elenca algumas vantagens da utilização das células a combustível a hidrogênio estacionário:

- a) As elevadas temperaturas podem ser usadas para gerar vapor, necessário

para o processo de “*reforming*” dos hidrocarbonetos, integrando todo o processo, dispensando a reformação externa. Ao nível residencial, o calor pode ser usado para aquecimento da água e em regiões frias, pode ser usada para aquecer o ambiente;

b) Com o intuito de garantir suprimento de energia confiável para mercados muito sensíveis, onde a falta de fornecimento de energia pode causar grandes transtornos ou prejuízos, como hospitais, centros de tratamento de dados e processos industriais que não podem ser paralisados. Assim, as interrupções inerentes ao fornecimento exclusivo de energia são superadas, evitando que estes mercados sensíveis sejam atingidos;

c) Em regiões remotas, onde os custos para se levar uma rede de distribuição são muito elevados, a utilização das células a combustível estacionária em nível local pode ser uma opção a ser implantada;

d) Pode funcionar complementando e aumentando a capacidade da rede, atendendo qualquer aumento de demanda, sem que sejam realizados pesados investimentos na construção de novas centrais elétricas;

e) São livres de emissões de gases de efeito estufa, e são bem silenciosos, por isso tem menor custo ambiental;

f) A utilização de vários insumos (por exemplo, gás natural, propano, metanol, etanol, gásóleo, gasolina) oferece grande flexibilidade, ajudando a reduzir a dependência de energia elétrica de outras regiões;

g) Requer pouca manutenção, tendo em vista que não possuem peças mecânicas, podendo funcionar continuamente, desde que tenha o combustível, e;

h) Constitui um complemento para as energias renováveis, visto que permitem a criação de sistemas híbridos, combinando-as células a combustíveis, permitindo resolver os problemas da intermitência característica das energias renováveis.

Mesmo com estas vantagens, a utilização das células a combustível estacionária não está ainda bem definida. Embora o preço destas células esteja decaindo, o custo ainda é muito elevado comparado a outras soluções disponíveis no mercado. Além disto, a utilização das células a combustíveis é composta por outros

importantes componentes. Primeiro, precisa-se de um reformador que converta os hidrocarbonetos em hidrogênio para alimentar as células a combustível. Depois, se combina o hidrogênio com o oxigênio, convertendo diretamente em energia elétrica. Tem de se levar em conta também que a utilização continua servirá para diluir os altos custos da implantação (DIAS, 2002, p. 100).

É certo que o desenvolvimento tecnológico das células a combustível irá mudar radicalmente a geração de energia elétrica. A perspectiva de geração descentralizada mudará toda rede, trazendo pequenas centrais elétricas mais perto do consumidor final em substituição as grandes centrais localizadas longe dos centros de consumo. Estas pequenas centrais elétricas são menos poluentes porque são alimentadas por combustíveis fósseis com menor teor de carbono ou diretamente por hidrogênio produzido a partir de fontes primárias renováveis. Desta forma, a possibilidade de geração descentralizada irá revolucionar o mercado de produção de energia elétrica, criando condições para um mercado concorrencial, e assim, acabando com os monopólios naturais<sup>48</sup> (DIAS, 2002, pp. 100-101).

O mundo vem vivendo uma intensa transformação em busca de fontes energéticas mais limpas e renováveis. O desenvolvimento da tecnologia para a utilização do hidrogênio como vetor energético é uma das alternativas na busca pela sustentabilidade do desenvolvimento. Os esforços internacionais e os desafios encontrados para a promoção do hidrogênio como um dos vetores energéticos é, pois, o objetivo da próxima seção.

## 2.3 ESFORÇOS INTERNACIONAIS RUMO À ECONOMIA DO HIDROGÊNIO

O cientista John Burden Sanderson Haldane em 1925 já antecipava alguns obstáculos que seriam enfrentados para a utilização do hidrogênio como vetor energético:

“Haldane chegou mesmo a antecipar os obstáculos no caminho da transição para um regime de energia do hidrogênio, bem como as consequências sociais e ambientais de longo alcance que daí resultaria. Quanto ao primeiro problema, ele reconhecia que “os custos iniciais seriam bastante

---

<sup>48</sup> Monopólio natural, onde a economia de escala é fundamental para sua eficiência, traduzindo em grandes investimentos iniciais.

consideráveis, mas as despesas de manutenção seriam menores que as de nosso atual sistema”. A grande vantagem social de adotar-se um regime de energia do hidrogênio era que “a energia será tão barata em uma parte do país como em outra, de modo que o mercado será em grande parte descentralizado”. Os benefícios ao meio ambiente, observou Haldane, seriam igualmente atraentes, uma vez que “não se produziriam cinza nem fumaça” (RIFKIN, 2003, p. 184).

Haldane (1925) reconheceu as dificuldades de se implantar o hidrogênio como combustível, isso se deve em grande parte pelos custos associados à mudança da infraestrutura como postos de combustíveis, veículos, geradores elétricos, motores, linhas para o transporte do combustível entre outros. Porém ele reconhece que os benefícios ambientais advindos com a sua utilização fariam com esse insumo tivesse um papel importante no desenvolvimento das cidades. Além disso, a utilização do hidrogênio pode descentralizar a produção e desta forma evitaria os riscos energéticos presente nos combustíveis fósseis.

Com o intuito de tentar reunir esforços para incentivar o desenvolvimento da economia do hidrogênio, e desta forma reduzir os custos de implantação do hidrogênio como vetor energético, foi criada em 2003, por iniciativa do Departamento de Energia (DOE) dos Estados Unidos uma Parceria Internacional para a Economia do Hidrogênio (IPHE). Esta parceria tem o propósito de organizar e implementar as pesquisas no nível internacional. Estas pesquisas visam o desenvolvimento de novas tecnologias, das atividades de utilização comercial e dos projetos de demonstração da utilização do hidrogênio como combustível, bem como das células a combustível (CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010, p. 14).

Esta união em nível mundial para a criação dessa estrutura teve a princípio a presença de 16 membros: Alemanha, Austrália, Brasil, Canadá, China, Comissão Europeia, Federação Russa, Estados Unidos, França, Índia, Islândia, Itália, Japão, Noruega, República da Coreia e o Reino Unido, mais tarde se uniram a Nova Zelândia e a África do Sul.

No âmbito da IPHE existe um fórum para políticas avançadas, normas e padronização técnica. Espera-se que este fórum traga grandes benefícios na implementação da economia do hidrogênio, já que isso reduziria os custos relacionados à integração do sistema em nível mundial, e assim poderá acelerar a transição para uma base tecnológica do hidrogênio como vetor energético (CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010, p. 14).



A instituição de um Programa [Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio- PROH<sub>2</sub>] neste caso é bastante recomendada face à grande complexidade do problema e às múltiplas áreas de conhecimento que estão envolvidas no seu equacionamento. A aplicação de células a combustível envolve os setores de produção de eletricidade, combustíveis, indústria automotiva e seus fornecedores, novas indústrias emergentes e os potenciais usuários da tecnologia. Sua aplicação será facilitada, ou não, por ações dos vários órgãos do governo federal, estadual e municipal. A ação coordenada dos vários órgãos do governo acelerará o desenvolvimento industrial e a verificação dos sistemas mais apropriados para a matriz energética brasileira. Nesse sentido, o Programa garante o uso mais racional dos recursos investidos e antecipa o alcance dos objetivos (CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2002, p. 1).

Há várias razões indicadas pelos países membros da IPHE em elaborar o roteiro, dentre as quais se destacam a redução dos gases do efeito estufa e a segurança energética, o uso mais eficiente dos combustíveis fósseis, a utilização de energia que reduz os impactos ambientais e toda uma nova cadeia econômica advinda da utilização do hidrogênio como vetor energético. Além disso, o uso desta tecnologia possibilitará o aproveitamento mais eficiente dos recursos energéticos das cadeias de produção local (CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010, p. 15).

Um dos objetivos desta parceria é de desenvolver essa tecnologia nos países membros, desta forma, a IPHE propõem várias ações que visam criar uma cadeia da economia do hidrogênio em todo o mundo: integrando entidades governamentais e a iniciativa privada para investimentos nas áreas de pesquisa básica, pesquisa aplicada e no desenvolvimento de produtos e serviços; inserir o governo como o grande incentivador destes projetos; e criação de códigos, normas e padrões semelhantes em todo o mundo e desta forma, se reduzir os custos de adaptação da tecnologia de um país para o outro.

Com a intenção de reduzir os preços dos equipamentos e das estruturas ligadas a cadeia do hidrogênio, muitas nações concedem incentivos às empresas de seu país que fazem parte dessa cadeia. Empresas sediadas principalmente no Canadá, Estados Unidos, Alemanha, China e Japão recebem de seus governos grandes encomendas de células a combustível e até mesmo subsídio, o que reduz os custos e os transformam em grandes competidores internacionais.

Como essas empresas já estão estabelecidas no mercado mundial fica mais difícil a concorrência em nível internacional das empresas brasileiras, que não possuem este tipo de incentivo. Porém, existem várias rotas possíveis para a produção do hidrogênio e diversos países do mundo estão desenvolvendo suas tecnologias das

mais variadas fontes, de acordo com o seu potencial. Os Estados Unidos, por exemplo, investem na produção centralizada do hidrogênio, se utilizando principalmente da energia nuclear, do carvão e do gás natural. Dias (2002) argumenta que o uso de fontes de energia não renovável, como o carvão mineral e gás natural, para a obtenção do hidrogênio não pode ser considerada uma forma sustentável do ponto de vista ambiental, já que emite GEE. Por outro lado, a União Europeia incentiva à produção do hidrogênio através de fontes renováveis como a solar e a eólica, que do ponto de vista da sustentabilidade, trata-se de uma opção em que não há a emissão de dióxido de carbono (CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010, p. 25).

Neste sentido, cada país pode produzir o hidrogênio de acordo com o seu potencial de produção. Isso faz com que as possibilidades de desenvolvimento tecnológico por parte dos países que ainda não desenvolveram estas tecnologias sejam grandes, já que ainda podem contribuir para essa diversificação. Desta forma é possível construir uma estrutura nacional que consiga captar o potencial para a produção do hidrogênio combustível das mais variadas fontes de acordo com o seu país de origem<sup>49</sup>.

Em termos de produção mundial, cerca de 40 milhões de toneladas por ano de hidrogênio são produzidas e a tendência é dobrar em cada década (Internacional Energy Agency - IEA, 2011). A maior parte do hidrogênio é produzida por fontes de combustíveis fósseis, sendo destinado principalmente para as indústrias. O aproveitamento do hidrogênio para fins energéticos é mínimo e o motivo é que devido à concorrência com outras opções energéticas disponíveis no mercado, os custos relativos destes são maiores, como por exemplo, a utilização do combustível fóssil que é mais viável economicamente.

Porém, as grandes empresas de eletrônicos do mundo como a Samsung, Sony, Toshiba, Motorola, Panasonic, Hitachi entre outros, estão investindo na tecnologia do hidrogênio combustível, algumas possuem até mesmo patentes e protótipos desenvolvidos, e se depender do volume de investimento destas empresas, a tecnologia deverá estar consolidada em alguns anos (CGEE - Centro de Gestão e

---

<sup>49</sup>Por exemplo, as tecnologias de produção do hidrogênio a partir do bagaço da cana. porque existem poucos países que possuem este produto e o Brasil é um dos poucos que possui condições para explorá-lo.

Estudos Estratégicos, 2010, p. 40).

Com relação à utilização do hidrogênio para a geração de energia elétrica de forma estacionária, existem no mundo vários projetos de demonstração com grandes sistemas de cogeração de energia elétrica e calor. A potência desta aplicação está entre 200 KW e 3MW e se utilizam de gás natural, biogás e gás de síntese<sup>50</sup>. De acordo com o departamento de energia norte americano, essas células serão economicamente viáveis quando o custo de produção atingir US\$ 400/KW, o que deve acontecer em 2015 (CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010, p. 41).

Estão sendo desenvolvidos, principalmente na Europa e Japão, sistemas de geração de pequeno porte que podem ser utilizados nas residências e pequenas empresas e podem estar disponíveis a preços acessíveis já em 2020. Além desta, há aplicações que já são viáveis economicamente, como os sistemas de “*backup*” para as estações de radio-base, que fazem a substituição das baterias convencionais (CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010, p. 41).

Como exemplo da utilização do hidrogênio como combustível pode-se citar o Estado americano da Califórnia que em 2010 possuía vinte e seis postos de abastecimento de veículos movidos com esse combustível. Além disso, a cidade de *San Francisco* está em operação o projeto “*Zero Emission Buses*” – Zbus, que trata de um projeto de demonstração com doze ônibus que utilizam células a combustível para reduzir as emissões dos GEE. (CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2010).

Para quantificar a idéia do custo para a mudança do vetor energético dos derivados de petróleo para o hidrogênio, foi realizado um estudo pela *General Motors* dos Estados Unidos que estimou que seriam necessários recursos da ordem de 10 a 15 bilhões de dólares para a construção de 11.700 postos de combustíveis nos Estados Unidos. Este estudo leva em consideração a distância de 3,2 km entre um posto e outro nos grandes aglomerados e de aproximadamente de 40 km nas principais rodovias (GORGULHO, 2011).

O esforço internacional para a promoção do hidrogênio e alguns bons exemplos de

---

<sup>50</sup>Também conhecido com gasógeno ou gás de gasogênio é uma mistura de gases combustíveis, produzida a partir de processos de gaseificação, na combustão incompleta de combustíveis sólidos.

projetos de utilização que estão dando certo motiva cada vez mais o desenvolvimento desta tecnologia no Brasil. Assim na próxima seção será feito um levantamento das iniciativas nacionais para a utilização do hidrogênio como um dos vetores energéticos principais no Brasil baseado nos documentos oficiais do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação, do Ministério de Minas e Energia e do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Neste capítulo foi apresentada a matriz energética mundial e como o crescimento econômico está intimamente ligado às emissões de carbono na atmosfera. No atual contexto de questionamento do histórico padrão de desenvolvimento econômico que tem levado à exaustão de recursos naturais e à degradação ambiental, ganha proeminência o debate pelo desenvolvimento e uso de fontes limpas e renováveis de energia.

A geração de energia a partir do hidrogênio é uma das fontes alternativas em análise no mundo. Assim aspectos técnicos da produção, armazenamento e utilização da energia do hidrogênio foram apresentados como alternativa a utilização dos derivados de petróleo. A busca por uma alternativa energética capaz de conciliar crescimento econômico e proteção dos recursos naturais renova-se em importância no globo. Assim, o debate acerca do desenvolvimento do setor energético passa por três vetores: 1) Garantir oferta de energia necessária para sustentar o crescimento econômico. 2) O preço desta energia, e 3) a contribuição para a promoção do “esverdeamento” da matriz energética mundial, através de uma economia de baixo carbono.

A utilização do hidrogênio a partir de várias fontes poderá garantir uma oferta de energia capaz de sustentar o crescimento econômico. Muitos projetos relativos à energia limpa e renovável esbarram no problema da intermitência das fontes energéticas, como exemplo, pode-se destacar a utilização da energia solar, que durante um dia ensolarado pode gerar energia em excesso, sendo armazenado na forma de hidrogênio, e as noites e em dias nublados, pode-se reverter este processo para gerar energia elétrica.

Da mesma forma o preço da energia tenderia a se reduzir, visto que haveria menor ociosidade nas usinas geradoras de energia elétrica. De fato, a acumulação da energia na forma do hidrogênio pode contribuir para que se minimizem os investimentos na construção de novas usinas e na manutenção da ociosidade nos horários de menor demanda, desta forma, nestes horários se poderia produzir o

hidrogênio e nos horários de “pico” se revertia o processo, assim as usinas ficariam sempre a plena carga.

Do ponto de vista do “esverdeamento” da matriz energética mundial, a utilização do hidrogênio é visto como um vetor energético sustentável porque emite como subproduto somente água, que *a priori* pode ser descartado sem nenhum problema. Entretanto, esta opção energética permanece ausente do debate global voltado para a Rio +20, bem como nos documentos elaborados pelas Nações Unidas sobre a “economia verde”.

Mesmo assim, a utilização do hidrogênio como vetor energético está caminhando para o uso comercial, devido às reduções dos custos para a produção, armazenamento, transporte e uso deste vetor energético para as aplicações veiculares, estacionárias e portáteis. O próximo capítulo destina-se, pois, a apresentar e discutir o debate e as iniciativas para o desenvolvimento da energia do hidrogênio no Brasil.

### **CAPÍTULO 3**

## **ENERGIA DO HIDROGÊNIO: PANORAMA NO BRASIL**

O presente capítulo tem por função identificar e discutir o desenvolvimento da energia do hidrogênio no Brasil, com vistas a analisar as principais potencialidades e desafios para seu desenvolvimento no país.

O Brasil é identificado como país que dispõe de muitas opções para desenvolver sua matriz energética e que enfrenta o desafio para definir suas estratégias de desenvolvimento energético com vistas à sustentação do avanço econômico da próxima década. Encontra-se em solo brasileiro o maior potencial hidrelétrico do mundo<sup>51</sup>; condições climáticas favoráveis ao desenvolvimento da energia eólica; é um dos líderes globais na produção de energia a partir de biomassa; Possui a sexta maior reserva de urânio do planeta; está entre as vinte maiores reservas de carvão; está próximo a figurar entre os dez principais produtores globais de petróleo e gás natural; é o segundo maior produtor mundial de etanol e biocombustível e conta ainda com áreas para expansão. Além da evidente e imediata ligação entre geração de energia e crescimento econômico, e ainda os receios de enfrentamentos de problemas ambientais gerados por investimentos no setor energético, por um lado e de gargalos de suprimentos de energia elétrica experimentados por outro, a definição de uma nova política energética nacional requer contemporaneamente a conciliação com a busca da promoção do desenvolvimento econômico de forma mais sustentável (Análise Energia – Anuário 2012, 2012, p. 10-11).

Nos anos de 1970 e 1980 a conjuntura econômica e política da época fez com que o desenvolvimento do setor energético gerasse grandes passivos ambientais. Esse desenvolvimento desordenado repercute nos projetos para o aproveitamento do potencial elétrico até hoje, principalmente na região Amazônica. No período em questão, não havia preocupações a respeito aos impactos gerados pelos grandes projetos, um dos exemplos é a hidrelétrica de Balbina que possui uma gigantesca área alagada (2.360 quilômetros quadrados), ao passo que a usina hidrelétrica de Itaipu possui um reservatório cerca de 40% menor e gera 60 vezes mais energia. Esse projeto emite para a atmosfera quase dez vezes mais dióxido de carbono do

---

<sup>51</sup> 12% da energia hidrelétrica global é produzida no Brasil ( Análise Energia, Anuário 2012, p. 10)

que uma usina termelétrica com a mesma capacidade de geração.

Outro exemplo é a usina de Tucuruí, onde na formação da sua área alagada de 2.850 quilômetros quadrados, a vegetação não foi suprimida, fazendo com que a decomposição da vegetação causasse efeitos nocivos como a liberação de GEE e elevação da acidez da água. Esta última, por sua vez ocasiona a perda de biodiversidade e a corrosão das turbinas da usina.

O crescimento que o Brasil vem experimentando (3,8% ao ano em média entre 2002 e 2011) e almeja nos últimos anos, suscita novamente o debate acerca do planejamento energético e se este planejamento está apropriado para sustentar este crescimento econômico que está por vir. O temor de alguns especialistas é que se repita o que ocorreu em 2001, quando o país estava experimentando uma taxa de crescimento por volta de 4% ao ano, e quando entrou no ano de 2001 o país passou por uma crise de abastecimento a que se denominou de “apagão”. De fato o forte crescimento econômico associado a uma estiagem prolongada no Sul e a falta de planejamento energético adequado resultou numa frenagem do PIB de 4% ao ano para 1% ao ano em 2001.

Discriminação		2011	2015	2020	Variação anual		
					2010/ 2015*	2015/ 2020	2010/ 2020*
População residente	(10 <sup>6</sup> hab)	193,2	198,9	205,0	0,8%	0,6%	0,7%
PIB	(10 <sup>9</sup> R\$[2008])	3.360	4.084	5.212	5,0%	5,0%	5,0%
	per capita (R\$/hab)	17.393	20,5	25,4	4,2%	4,4%	4,3%
Oferta interna de energia	(10 <sup>6</sup> tep)	279,4	344,8	439,7	5,5%	5,0%	5,3%
	por PIB (tep/10 <sup>3</sup> R\$)	0,083	0,084	0,084	0,5%	0,0%	0,2%
	per capita (tep/hab)	1,447	1,733	2,145	4,7%	4,4%	4,5%
	(TWh)	571,6	689,0	867,3	5,0%	4,7%	4,8%
Oferta interna de eletricidade	por PIB (kWh/10 <sup>3</sup> R\$)	170,1	168,7	166,4	0,0%	-0,3%	-0,2%
	per capita (kWh/hab)	2.959	3.464	4.230	4,2%	4,1%	4,1%
	(10 <sup>6</sup> tep)	237,7	292,4	372,0	5,6%	4,9%	5,3%
Consumo final energético	por PIB (tep/10 <sup>3</sup> R\$)	1,230	1,470	1,815	4,8%	4,3%	4,6%
	per capita (tep/hab)	0,071	0,072	0,071	0,6%	-0,1%	0,3%

Figura 5 - Economia e energia – 2011-2020

Fonte: BRASIL (2011b, p. 76)

O debate energético atual no Brasil desenrola-se em várias frentes e intensa polêmica, tais como: expansão da geração de energia hidrelétrica na Amazônia com forte resistência ambientalista; retomada do Programa Nuclear em meio à profunda crise no setor suscitado pelo acidente na usina de Fukushima no Japão; expansão

do uso do petróleo e gás natural extraídos da região do pré-sal, com intenso debate no âmbito regulatório; ampliação do uso do carvão como fonte energética que em consonância com o debate internacional parece apontar para a necessidade de tratamento prévio para redução da emissão de dióxido de carbono; ampliação do uso do etanol e outros biocombustíveis, situados em debate internacional sobre a oferta de alimentos; e, finalmente fontes limpas e renováveis de energia como a eólica, a solar e a energia do hidrogênio que começam a se concretizar (mais para a eólica, menos para a solar e ainda menos para a energia do hidrogênio).

Nesse contexto, a sistematização de informações e análises voltadas para a identificação e reflexões sobre as principais potencialidade e desafios ao desenvolvimento da energia do hidrogênio no Brasil norteiam-se principalmente pelas análises e dados constantes na Análise Energia – Anuário 2012 e nos documentos oficiais do governo brasileiro “Plano Decenal de Expansão de Energia-PDE 2020 (MME, 2011)”, “Programa brasileiro Células a Combustível – ProCaC (MCTI, 2002)”, “Roteiro para a estruturação da Economia do Hidrogênio (MME, 2005)” e “Hidrogênio Energético no Brasil – Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025 (CGEE, 2010)”.

Em foco nas agendas governamentais e do setor privado, encontra-se ainda, a questão maior que segue: como deve ser a produção de energia elétrica no Brasil de modo a contribuir para que a indústria seja competitiva em uma economia com baixa emissão de GEE? Segundo a Confederação Nacional das Indústrias (CNI) em relação a suprimento o Brasil encontra-se em vantagem no cenário internacional, face à grande variedade de fontes existentes no país. Entretanto, a CNI aponta para um sério problema para a competitividade industrial: preço. O preço da energia elétrica é considerado um dos mais caros do globo, tendo inclusive se elevado 190% no período 2001 e 2010 contra 119% de elevação dos preços industriais no mesmo período (CNI – Informe Publicitário, Análise Energia – Anuário 2012, 2012, p. 22). Adicionalmente são muitas as indefinições relativas à busca de maior “esverdeamento” da matriz energética brasileira.

O setor energético correspondeu a 4,3% do PIB brasileiro em 2009. De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia (BRASIL, 2011b), desse montante 686 milhões serão aplicados em petróleo e gás e o restante em outras atividades do setor energético. Para a geração de energia elétrica, o foco dos investimentos



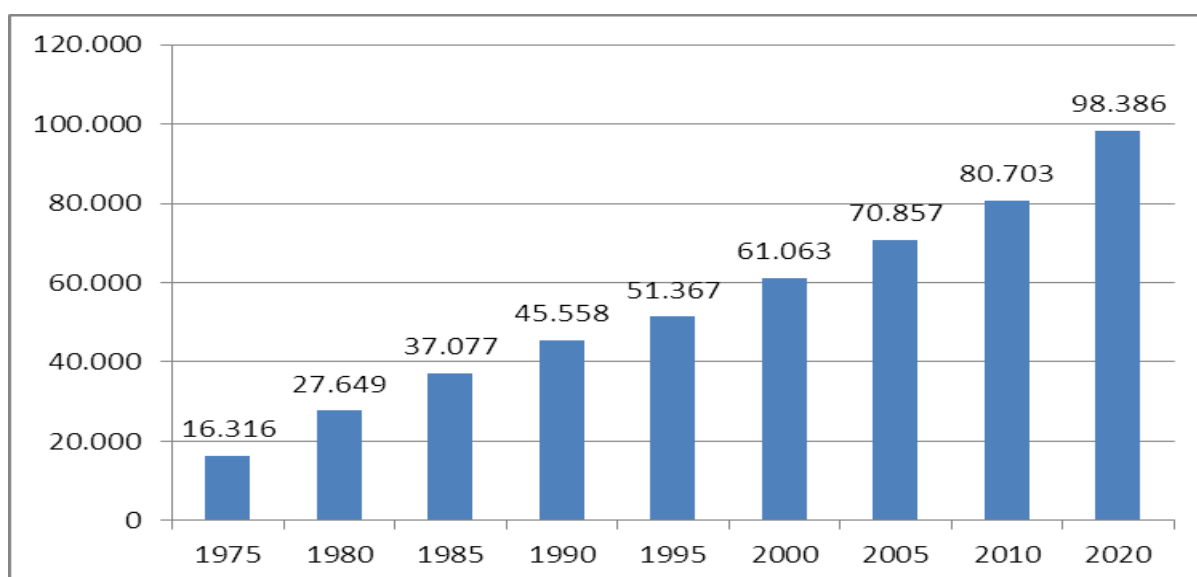
governamentais está em grandes projetos de hidrelétricas na região Amazônica, quais sejam:

Usina	Capacidade (MW)	Investimento (R\$)
Belo Monte, Pará	11.233	28 bilhões
Jirau, Rondônia	3.750	15,1 bilhões
Santo Antônio, Rondônia	3.150	15,1 bilhões
Teles Pires, Pará	1.820	3,6 bilhões
Santa Isabel, Pará	1.087	2 bilhões

**QUADRO 9 - PRINCIPAIS INVESTIMENTOS EM USINAS HIDRELÉTRICAS NA REGIÃO AMAZÔNICA.**

Fontes: (Santo Antônio Energia, 2012); (Ecodesenvolvimento, 2011); (BNDES, 2011); (AMAZONIA, 2012).

Da mesma forma, percebe-se um aumento da capacidade de geração de energia hidroelétrica no Brasil entre 1975 a 2020, conforme mostra o gráfico abaixo.



**GRÁFICO 6 - EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE HIDROELÉTRICA NO BRASIL 1975-2020**

Fonte: Análise energia – Anuário 2012 (2012, p. 20).

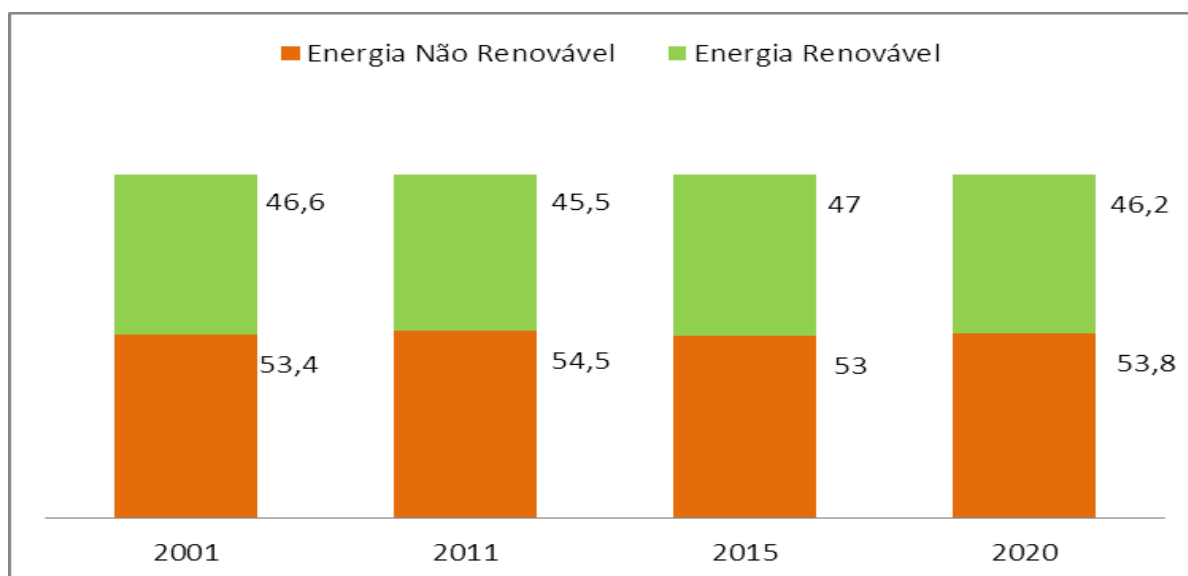
A matriz energética brasileira é caracterizada por forte participação das fontes de energia renovável, principalmente pelo grande potencial hídrico e do etanol produzido a partir da cana de açúcar, conforme segue.

**TABELA 3 - COMPARATIVO DA OFERTA INTERNA DE ENERGIA PRIMÁRIA NO BRASIL ENTRE 2001 A 2020**

<b>Fontes</b>	<b>2001</b>	<b>2011</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>
<b>Energia não renovável</b>	<b>53,4</b>	<b>54,5</b>	<b>53,0</b>	<b>53,8</b>
Petróleo e derivados	47,2	36,9	33,0	31,8
Gás Natural	8,9	10,6	12,4	14,4
Carvão Mineral e derivados	1,4	5,7	6,5	6,1
Urânio e derivados	0,4	1,3	1,1	1,4
<b>Energia renovável</b>	<b>46,6</b>	<b>45,5</b>	<b>47,0</b>	<b>46,2</b>
Energia hidráulica* e eletricidade	14,7	13,9	13,0	12,5
Lenha e carvão vegetal	14,3	10,2	9,7	8,3
Derivados da Cana de açúcar	14,6	18,2	20,4	21,8
Outras renováveis	3,0	3,3	3,9	3,6
<b>Total</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

\* 1KWH = 860 kcal (equivalente térmico teórico - primeiro princípio da termodinâmica)

Fonte: (BRASIL, 2011a, p. 20) (BRASIL, 2011b, p. 77).



**GRÁFICO 7 - ENERGIA RENOVÁVEL VS. ENERGIA NÃO RENOVÁVEL NO BRASIL ENTRE 2001 E 2020.**

Fonte: (BRASIL, 2011a, p. 20) (BRASIL, 2011b, p. 77).

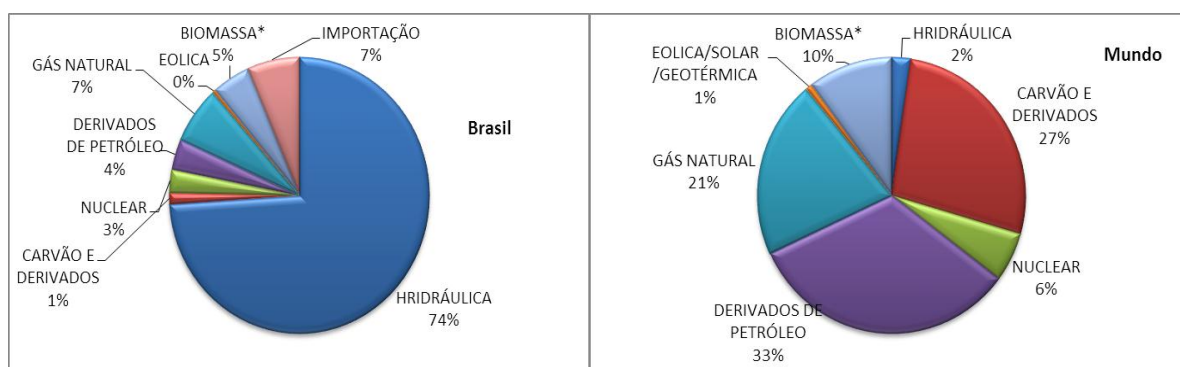
As fontes pesquisadas apontam para uma tendência do Planejamento do Governo Federal Brasileiro de privilegiar o uso de fontes mais limpas, dentre as quais mencionam-se. 1) Energia nuclear, termelétricas, energia eólica, energia solar e biocombustíveis. Em seu Plano Decenal de Expansão de Energia 2020, o governo brasileiro explicita que o destaque especial foi conferido à questão das emissões dos GEE em decorrência de compromisso governamental assumido durante a Conferência das Partes em Copenhague (COP-15) em que o Brasil anuncia metas voluntárias de reduzir entre 36,1 e 38,9% das emissões de GEE projetada para 2020. Essa meta foi referendada por meio da Lei nº 12.187, que instituiu a Política Nacional Sobre Mudança do Clima, promulgada pelo Congresso Nacional em dezembro de 2009.

Ressaltando que se encontra fora dos limites desta dissertação o detalhamento analítico da questão, informa-se tão somente que não se considera, no âmbito deste trabalho as fontes não renováveis de energia nuclear, enquanto fonte limpa e renovável, pois embora não haja emissão de dióxido de carbono, são grandes os riscos de radioatividade.

Ressalte-se que no Planejamento Energético brasileiro, observa-se uma postura passiva, limitada às preocupações com a segurança energética, risco de “apagão”; tímido, portanto na exploração da grande potencialidade energética que o país

apresenta; e que poderia ter como meta a transformação do Brasil em país exportador de energia.

Nos documentos oficiais enfocados, nota-se uma total ausência da alternativa energética de produção de eletricidade a partir do hidrogênio. Os gráficos 8 e 9 explicitam a matriz energética global e brasileira, dos quais se depreende que a matriz brasileira possui uma composição de fontes renováveis bem maior que a mundial.



**GRAFICO 8 - OFERTA DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTE – A ESQUERDA BRASIL E A DIREITA O MUNDO**

Fonte: Brasil (2011a, p. 16), International Energy Agency – IEA (2011).

A geração de energia elétrica no Brasil é predominantemente de fontes renováveis (79,1%), enquanto que no mundo este percentual é de apenas 13,3%. A utilização do hidrogênio como fonte energética, nesse contexto de “esverdeamento” da matriz energética nacional deve, portanto, ter como pré-requisito a realização da eletrólise para a obtenção do hidrogênio a partir do uso de fontes renováveis. Nestes termos, o Brasil parece estar em ligeira vantagem em relação aos outros países, podendo produzir o hidrogênio a um custo ambiental menor, conforme alerta Dias (2002).

“[...] se quisermos ter em conta a totalidade dos danos ambientais desta solução temos de considerar a forma como a eletricidade foi produzida. Se a eletricidade que os alimenta foi produzida a partir do carvão, apesar de não haver custos ambientais ao nível da utilização, há-os ao nível da produção; deve-se por isso ter em conta possíveis impactos ambientais indiretos” (DIAS, 2002, p. 94).

Em sintonia com Dias, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE (2010, p.7) afirma:

“No Brasil, cujos recursos naturais renováveis são abundantes e cuja matriz energética possui elevada participação de fontes energéticas renováveis, o desenvolvimento de tecnologias para a economia do hidrogênio certamente

contribuirá para uma utilização mais eficiente dessas fontes energéticas, além de possibilitar uma participação importante no mercado mundial de equipamentos e serviços relacionados às energias renováveis e ao hidrogênio. Dessa forma, o engajamento do país na corrida para a implantação da economia do hidrogênio é altamente estratégico dos pontos de vista econômico, tecnológico e ambiental”.

Assim, o CGEE argumenta que com o desenvolvimento de tecnologia para o uso do hidrogênio como vetor energético, é possível refletir a eficiência na geração de energia elétrica brasileira para os outros segmentos da economia como o transporte e a indústria. Para isso, podem-se utilizar as células a combustível de hidrogênio, que poderá levar a uma redução dos custos ambientais pela eficiência dos motores elétricos associados às células a combustível que poderão reduzir significante a emissão de gases do efeito estufa pelo setor de transporte, bem como a melhoria das plantas industriais privilegiando a utilização das fontes limpas e renováveis de energia para a produção do hidrogênio. Diante do cenário de busca de formas alternativas para garantir o acesso à energia ao maior número de pessoas de forma mais limpa e segura, a utilização do hidrogênio poderá vir a se tornar o vetor energético do século XXI.

A energia do hidrogênio por seu turno, ainda não aparece no Plano Decenal nem nas publicações técnicas do Setor Energético: “Análise Energia – Anuário 2012”, sendo focado apenas em documentos prospectivos estratégicos desenvolvidos no âmbito do governo federal brasileiro pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI (Programa Brasileiro Célula a Combustível, 2002); Ministério de Minas e Energia – MME (Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio, 2005), e; Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE (Hidrogênio Energético no Brasil – subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025, 2010). Portanto, norteados pelos vetores oferta de energia, preço e contribuição para a promoção do “esverdeamento” da matriz energética e de uma economia de baixo carbono no Brasil, passar-se-á, pois, a análise dos documentos estratégicos, supra mencionados, elaborados no país para o desenvolvimento da energia do hidrogênio.

### 3.1 INICIATIVAS NACIONAIS RUMO À ECONOMIA DO HIDROGÊNIO

Para a análise dos esforços nacionais para a promoção da economia do hidrogênio

será utilizado o documento do “Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para Sistema de Célula a Combustível” (ProCaC, 2002) criado pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI. Além deste programa, existe ainda o “Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil”, publicado em 2005 pelo Ministério de Minas e Energia – MME. Já em 2010, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE publicou o documento intitulado “Hidrogênio energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025” que norteará o trabalho sobre as iniciativas nacionais para a promoção do hidrogênio combustível.

O MCTI estimula ações para o desenvolvimento de tecnologia do hidrogênio desde 1995. Assim em 1998 ajudou na criação do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio – CENEH. Este centro realiza e coordena pesquisas em parcerias com outras instituições, com a finalidade de promover a divulgação e a difusão de informações sobre programas, projetos, pesquisas, desenvolvimentos científicos e tecnológicos do aproveitamento do hidrogênio como vetor energético. Além disso, também desenvolve alianças estratégicas e promove a capacitação e treinamento de mão de obra.

Em 1999, o MCTI passou a avaliar que o desenvolvimento de tecnologia para a reforma do etanol para produção de hidrogênio poderia se tornar um nicho de mercado para o Brasil. Já em 2001, no Congresso Anual da ANEEL de P&D, a Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG e a CLAMPER apresentaram o protótipo de célula a combustível que se utilizava do etanol como combustível para as aplicações estacionárias.

Entre as principais conclusões do CGEE (2002), ressaltou-se que não existia no país uma instituição que poderia realizar isoladamente o desenvolvimento completo dos sistemas da célula a combustível, identificando a complexidade do desenvolvimento desta indústria, o que demanda um intenso esforço de P&D, e a oportunidade de ampliar-se a colaboração entre os diferentes grupos de pesquisa.

Desta forma, viu-se a necessidade de estruturar um programa de trabalho sob a forma de uma rede de pesquisa e desenvolvimento. Para isso, o MCTI definiu como sendo necessário a promover a coordenação das ações e projetos de cada instituição; estruturar um plano para recompor e compartilhar a infraestrutura já instalada, apropriando-a ao novo conceito de desenvolvimento; fomentar a capacitação de recursos humanos; implantar um sistema de informações e

intercambio de conhecimentos entre os envolvidos, e; incentivar as empresas brasileiras na absorção desta tecnologia.

Este trabalho também identificou que um dos nichos de mercado mais promissores para a aplicação desta tecnologia no Brasil seria o de geração distribuída de energia elétrica com potência entre 5 a 200 KW, o que iria ao encontro da política nacional de universalização dos serviços de energia elétrica e de telecomunicações. Também foram identificados os desafios para a instalação desses sistemas:

- a) Na produção, armazenagem e distribuição do hidrogênio;
- b) Nas células de eletrólito polimérico – detalhes de engenharia<sup>52</sup> e a baixa temperatura de operação que torna menos efetiva a cogeração.
- c) Nas células de óxido sólido – engenharia de matérias de alta temperatura, selagem dos elementos cerâmicos, dificuldades relacionadas à reforma interna dos combustíveis (hidrocarboneto);
- d) Nos novos materiais para eletrodos, catalisadores e eletrólitos sólidos;
- e) Na capacitação de recursos humanos;
- f) No desenvolvimento e garantia de propriedade de patentes de produtos e serviços e do direito de comercialização;
- g) Na regulação quanto à segurança e padronização;
- h) Na competição com alternativas tecnológicas equivalentes;
- i) Na necessidade de parceria entre as instituições do governo, setor industrial, academia, entre outras, e;
- j) Na necessidade de uma política para a indústria de alta tecnologia.

Devido essas dificuldades apontadas pelo trabalho do CGEE, no ano de 2002 o MCTI lançou o “Programa brasileiro de sistemas célula a combustível”, com o intuito de coordenar as pesquisas brasileiras nesta área, além de capacitar e treinar os recursos humanos envolvidos. Desta forma, na próxima seção será apresentado este programa do MCTI.

---

<sup>52</sup> manejo de calor/ água no interior da célula, montagem e custos dos conjuntos membrana- eletrodo, produção em série (BRASIL, 2002, p. 14)

### **3.1.1 Programa brasileiro de sistemas célula a combustível - MCTI**

A promoção dos sistemas de células a combustível de hidrogênio envolve amplas e múltiplas áreas do conhecimento<sup>53</sup>, assim um problema de natureza tecnológica e que envolve competitividade internacional, aliado ao desejo de criar indústrias brasileiras de alta tecnologia necessita promover o financiamento de um programa integrado, com metas estabelecidas e compromissos de colaboração de longo prazo entre governo, empresas, universidade, centros de pesquisa entre outros envolvidos.

O principal objetivo deste Programa é promover ações integradas e cooperadas, que viabilizem o desenvolvimento nacional da tecnologia de célula a combustível, habilitando o país a se tornar um produtor internacionalmente competitivo nesta área. Para que possa atingir os objetivos propostos, as entidades participantes deverão atuar na forma de redes cooperadas de pesquisa. Se por um lado, a organização e a gestão dessas redes devem propiciar o dialogo e o entendimento, garantindo a participação de todos, por outro as informações precisam ser organizadas e qualificadas, permitindo a avaliação e correção dos rumos e estratégias com maior agilidade.

A proposta deste programa visa produzir energia elétrica com tecnologia limpa e eficiente, sendo aplicado inclusive nos sistemas auxiliares e de propulsão: nas aplicações automotivas, embarcações, aeronaves, entre outras. Pretende-se ainda apoiar a indústria nacional para a produção e fornecimento de produtos e serviços para este sistema energético. Deve-se ainda assegurar a proteção da propriedade intelectual, repartindo o direito de propriedade entre as pequenas e grandes empresas envolvidas.

Este programa prevê também a participação do setor privado, e com o intuito de alavancar sua participação, o MCTI disponibilizaria diversos instrumentos de fomento do Sistema de Ciência, Tecnologia e Inovação tais como: financiamento a taxas reduzidas, subsídios, incentivos fiscais, entre outros.

O programa prevê oito ações: 1) Estabelecimento de rede das instituições, empresas, incubadoras e infraestrutura em Sistemas de célula a Combustível. 2) Articulação de uma rede de especialistas. 3) Capacitação e treinamento de recursos humanos. 4) Implementação de projetos que privilegiem o uso de combustíveis

---

<sup>53</sup> Pode-se incluir a química, a física, a eletrônica, a mecânica entre outras áreas.



renováveis nacionais, principalmente o etanol. 5) Revitalização da infraestrutura de laboratórios e de centros de pesquisa. 6) Implementação de projetos de demonstração de diferentes sistemas de células a combustível. 7) Implementação de projetos de desenvolvimento tecnológico da reforma e do uso direto de etanol. 8) Desenvolvimento de tecnologias complementares.

Com estas ações o ProCaC proporcionaria o desenvolvimento do mercado de células a combustível: na produção e comercialização de componentes, de novos produtos e serviços, e no desenvolvimento de processos e tecnologias; produção e suprimento descentralizado de energia elétrica<sup>54</sup>; ampliação da produção e do uso do hidrogênio como vetor energético<sup>55</sup>; Estabelecimento e consolidação de empresas de base tecnológica; além da possibilidade de comercialização e exportação de *Know-how*, produtos, processos e serviços.

A concepção deste programa estava voltado basicamente para o desenvolvimento de P&D&I para a cadeia do hidrogênio combustível. Neste contexto, o MME se utiliza do termo “Economia do Hidrogênio”, que pode ser entendido como um “mercado estruturado, criado a partir de um marco regulatório que permita a sua comercialização a preços competitivos, com qualidade, confiabilidade e segurança no suprimento” (BRASIL, 2005, p. 7), para elaborar um roteiro para a estruturação deste mercado no Brasil, assim será apresentado na próxima seção este roteiro.

### **3.1.2 Roteiro para a estruturação da economia do hidrogênio - MME**

Diante das ações propostas pela IPHE, o Ministério de Minas e Energia no ano de 2005 lançou um Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil que elencava algumas premissas que deveriam ser o guia para o desenvolvimento desse mercado no Brasil: a diversificação da matriz energética brasileira; a redução dos impactos ambientais; a garantia da independência dos combustíveis fósseis; desenvolvimento de tecnologia para a produção de hidrogênio a partir de fontes de energia renovável; desenvolvimento de tecnologia capaz de garantir a confiança do

<sup>54</sup> Este aumento de oferta de energia elétrica viria acompanhada por um aumento da qualidade e confiabilidade do sistema elétrico nacional (BRASIL, 2002, p. 22)

<sup>55</sup> Contribuindo para a diversificação da matriz energética nacional, a conservação de energia e a eficiência no uso e geração de energia, e a redução das emissões de carbono (BRASIL, 2002, p.22)

consumidor; e planejar o envolvimento de toda a indústria nacional para o desenvolvimento da economia do hidrogênio.

Este Roteiro verificou o pioneirismo brasileiro na geração de energia primária por fontes de energia renovável, desta forma a integração destas fontes com a utilização do hidrogênio poderá trazer grandes benefícios para o país. De fato, o Brasil possui um dos programas de energia renovável mais bem sucedido no mundo, o etanol. A combinação dessas fontes de energia renovável que o Brasil já possui, poderá contribuir para que o hidrogênio seja um importante vetor energético com baixa emissão de carbono. Aliado a esta fonte renovável, existem outras que estão bem desenvolvidas no Brasil, como a hidrelétricas<sup>56</sup>, e outras com grande potencial, como a eólica, solar, maremotriz, biodiesel, entre outras.

Este roteiro deixa claro que a utilização do hidrogênio no Brasil é simplesmente para o uso industrial, principalmente para as indústrias de petróleo, alimentícia, de fertilizantes e de aço. O hidrogênio utilizado para fins energéticos é muito pequeno e quase sempre associado aos projetos de demonstração desta tecnologia. Os sistemas de eletrolise da água não são competitivos e a reforma do gás natural só é viável em grande escala. Assim o país possuía somente três plantas estacionárias de células a combustível tipo PAFC em operação, duas no Paraná e uma no Rio de Janeiro com potência de 200 KW cada uma<sup>57</sup>. Com relação ao transporte coletivo, existiam em 2004 dois projetos de demonstração em desenvolvimento no Brasil<sup>58</sup>.

Para a cadeia de suprimentos do hidrogênio como vetor energético, o relatório identificou seis ambientes, conforme a mostra a figura 6.

---

<sup>56</sup> Embora a hidroeletricidade possua grande participação na matriz energética brasileira, somente 24% do potencial hidrelétrico aproveitável são explorados no Brasil. (ANEEL, 2005)

<sup>57</sup> Estas usinas são alimentadas com gás natural reformado a hidrogênio (BRASIL, 2005, p. 12)

<sup>58</sup> Projetos desenvolvidos em São Paulo e no Rio de Janeiro em parceria respectivamente de MME, MCTI/FINEP, EMTU-SP, GEF e o PNUD; COPPE/UFRJ, MCTI/FINEP, LACTEC, PETROBRAS, CAIO-INDUSCAR e da ELETRA (Foster, Araújo, & Silva, 2005).

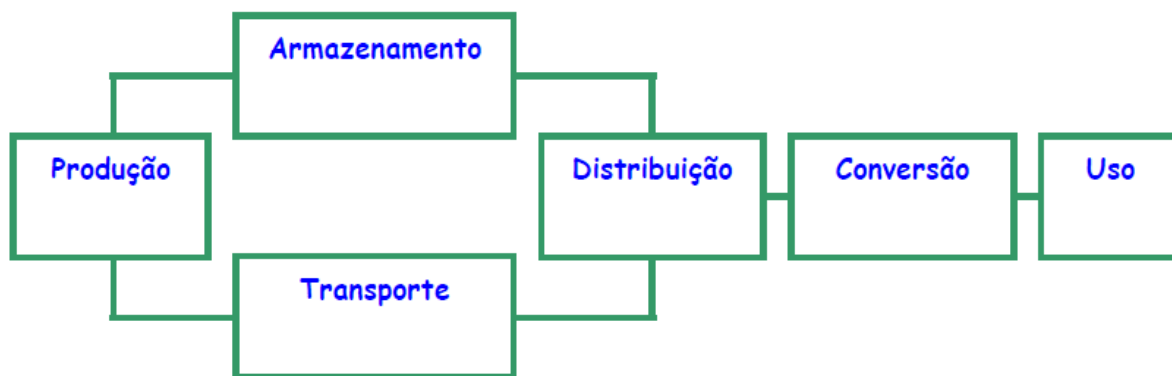


Figura 6 - Cadeia do suprimento do hidrogênio como vetor energético.

Fonte: (Brasil - Ministério de Minas e Energia, 2005, p. 16)

Em termo da produção do hidrogênio, o relatório identifica cinco processos principais para serem utilizados para a produção de hidrogênio energético no Brasil: reforma do etanol; eletrolise da água; reforma do gás natural; gaseificação da biomassa; biológico (biogás); alternativos como o fotovoltaico acoplado ao eletrolisador de água e a bioprodução.

A reforma do etanol é vista como viável para o Brasil devido a sua estrutura consolidada nos últimos trinta anos para a produção, transporte e armazenagem deste combustível. Porém o processo de reforma ainda não é comercialmente viável no Brasil, sendo o reformador uma tecnologia embrionária<sup>59</sup>. Já o processo de eletrolise da água é conhecido e utilizado por várias empresas no Brasil, este processo pode beneficiar muito o Brasil porque a maioria das usinas instaladas acaba por verter água turbinável<sup>60</sup>, principalmente as pequenas usinas conhecidas como fio d'água<sup>61</sup>, assim pode-se produzir o hidrogênio em horários fora do pico, assim não sobrecarregar o sistema, e quando o consumo de energia aumentar pode reverter o processo transformando o hidrogênio em energia elétrica novamente.

A reforma do gás natural se apresentava como a alternativa mais competitiva para a produção de hidrogênio no curto e médio prazo, sua tecnologia já é dominada e já se encontrava em estágio comercial, possuindo o menor custo para a produção do hidrogênio. Porém a reforma desta fonte produz dióxido de carbono em pequenas

<sup>59</sup> Os reformadores de etanol ainda não são viáveis, porém o roteiro identifica um potencial de utilização a partir de 2015 (BRASIL, 2005, p. 13)

<sup>60</sup> Água que poderia ser utilizada para gerar energia elétrica, mas que devidos a excesso de chuva, gerenciamento de recursos hídricos entre outros não são utilizados (BRASIL, 2005, p. 22).

<sup>61</sup> Estas hidrelétricas tem como característica um pequeno reservatório de água, desta forma ficam mais dependentes das condições do volume do rio (BRASIL, 2005, p. 22),

quantidades, por isso não é a mais forma mais sustentável no longo prazo.

Segundo o relatório a gaseificação e a biodigestão ou decomposição da matéria orgânica são os métodos de extração do hidrogênio que possui a maior viabilidade no Brasil porque existem atividades comerciais voltadas à produção de gaseificadores. Porém este método produz um gás com muitas impurezas dificultando a sua utilização em células a combustível. Contudo, já estava sendo desenvolvido em 2005 gaseificadores de 2ª geração que podem reduzir essas impurezas.

Os métodos alternativos para a produção de hidrogênio combinam o processo fotovoltaico e o eletrolisador de água ou pela produção biológica de hidrogênio decorrente do metabolismo de microrganismos. A produção pelo processo fotovoltaico é o mais desenvolvido, pelo fato da tecnologia ser conhecida. Já a bioprodução depende de avanços tecnológicos na área de biotecnologia.

Na logística do hidrogênio, o relatório identifica duas formas: a indireta, quando o hidrogênio é gerado no local de uso; a direta, quando é produzido previamente e tem que ser transportado, e/ou armazenado e/ou distribuído. O hidrogênio pode ser também manuseado na forma gasosa, líquida, adsorvido fisicamente em estruturas sólidas ou ligados quimicamente a outros compostos. Segundo relatório, em 2005 não existia no Brasil infraestrutura logística para o hidrogênio. Porém a utilização dos gasodutos compartilhados com o gás natural podem se tornar uma estratégia que necessitaria de baixos investimentos no curto prazo, tendo em vista a grande extensão de gasodutos instalados no país.

Além disso, o Brasil deve ainda analisar o potencial de distribuição do etanol para incentivar o uso descentralizado do hidrogênio, o que significa que ao invés de investir em uma estrutura centralizada de produção do hidrogênio, e desta forma ter que criar novas redes de distribuição para transporta-lo, poderia produzi-lo de forma descentralizada, utilizando as redes de distribuição do etanol já existentes.

No sistema de conversão energética do hidrogênio o relatório do MME identificou grupos de pesquisa atuando no desenvolvimento de células a combustível e que estavam obtendo sucesso<sup>62</sup>. O relatório apontou o potencial de crescimento da

---

<sup>62</sup> Há disponibilidade de sistemas com células a combustível de baixa potencia (25 W a 5KW), estão em estagio pré-comercial as células com potencia entre 5KW a 75KW, e a previsão é que até 2010 já pudesse ser ofertada os sistemas de até 250KW de potência.

célula a combustível para geração distribuída, principalmente em hospitais, bancos, aeroportos entre outros com um potencial de crescimento em torno de 4% ao ano.

O relatório fez um balanço da maturidade tecnológica do hidrogênio no Brasil e a maioria dos itens pesquisados foi compreendida como embrionário<sup>63</sup>. Assim, destacou-se a importância da intensificação da pesquisa e desenvolvimento para a progressiva maturação da tecnologia da cadeia do hidrogênio. Mesmo assim existem projetos brasileiros que estavam sendo desenvolvidos, conforme mostra o quadro abaixo.

Item	Descrição/ tecnologia	Participantes	Potência (KW)
1	Projeto de demonstração de 3 células a combustível, tipo PAFC, alimentadas com gás natural, fabricada nos EUA.	COPEL e LACTEC	600
2	Projeto de demonstração de tecnologias de geração distribuída, envolvendo uma 1 célula a combustível, tipo PAFC, alimentada a gás natural, fabricada nos EUA.	CENPES	200
3	Projetos de desenvolvimento de células a combustível de pequeno porte, tipo PEM.	CEMIG, EESC/USP, CLAMPLER e UNITECH	1,5
4	Projeto de desenvolvimento de células a combustível, tipo PEM, alimentada por hidrogênio eletrolisado.	AES ELETROPAULO e ELECTROCELL	50
5	Projetos de demonstração de célula a combustível para pequenas comunidades na Amazônia, tipo PEM.	ELETRONORTE e UFPA UNICAMP e UFAM UNICAMP e UFMT	11
6	Projeto de demonstração de célula a combustível, tipo PEM, alimentada por gás natural, fabricada nos EUA.	CPFL, LACTEC e UNICAMP	6
7	Projeto de demonstração de célula a combustível, tipo PEM, fabricada no Brasil, alimentada com gás natural e com reformador importado dos EUA.	CEPEL, CHESF e ELECTROCELL	5
8	Projeto de desenvolvimento de célula a combustível, tipo PEM.	LIGHT e UNITECH	10

#### **QUADRO 10 - PROJETOS BRASILEIROS COM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL PARA GERAÇÃO ESTACIONÁRIA**

Fonte: Brasil, 2005, p. 52

Os documentos propostos pelo governo para implantar a economia do hidrogênio foram sem dúvida uma marco para este setor, porém é necessário avaliar também

<sup>63</sup> Entendido como tecnologia que está em acelerada mudança da base do conhecimento

se essas políticas estão sendo realmente implantadas. Desta forma, na próxima seção será analisado o documento da CGEE (2010) a respeito dos incentivos à economia do hidrogênio.

### **3.1.3 Incentivos à economia do hidrogênio**

Com relação aos incentivos para a economia do hidrogênio, os investimentos tanto públicos quanto os privados devem ser direcionados a fim de garantir o melhor aproveitamento do potencial brasileiro. No documento elaborado pela CGEE (2010, p. 17), os investimentos realizados no Brasil para a promoção da economia do hidrogênio há que se destacar que a criação de novos laboratórios e centros de pesquisa apropriados para dar suporte à atividade industrial, ou a oferecer treinamento está prejudicada devido ao baixo nível de investimento. Para ilustrar o que ocorre, o Brasil investiu entre os anos de 1999 e 2007 R\$ 134 milhões, o que corresponde a aproximadamente a 25% dos investimentos realizados pela Rússia, ou Índia, ou China, que junto com o Brasil formam os BRIC's. Em comparação com os países desenvolvidos o volume de investimento feito pelo Brasil corresponde de 3% a 5% dos realizados pelo Japão, União Europeia ou Estados Unidos.

No âmbito da padronização, o INMETRO possui reconhecimento a nível internacional, porém ainda não se inseriu neste contexto de certificação para a cadeia do hidrogênio, conforme afirma o CGEE (2010, p. 17):

“O Inmetro, que desenvolve programas de avaliação da conformidade reconhecidos internacionalmente – que geram, entre outros produtos, a certificação e a etiquetagem– já poderia se inserir neste contexto de necessidade de certificação. Além disso, há a necessidade do apoio aos programas de Tecnologia Industrial Básica (TIB), uma vez que o Brasil já está atingindo um maior patamar na área de hidrogênio, com a necessidade de maior desenvolvimento da pesquisa aplicada e das etapas seguintes, de demonstração e comercialização de bens ligados ao hidrogênio energético. Isso ocorreria com um suporte maior à cadeia “metrologia, normalização, regulamentação técnica e avaliação da conformidade”, estando incluído também o aumento da confiabilidade metrológica nas medições em sistemas de células a combustível. Da mesma maneira existe um volume insuficiente de normas e padrões nacionais relacionados à utilização energética do hidrogênio. As normas existentes são traduções de normas ISO e IEC, que possuem poucas contribuições efetivas do Brasil”.

No Brasil, os projetos de demonstração da tecnologia de hidrogênio, das células a combustível, dos sistemas híbridos ou no segmento de produção, armazenagem e transporte de hidrogênio praticamente não existem (CGEE, 2010, p. 18), sendo que

estes são fundamentais para dar visibilidade à tecnologia, além de fazer testes de longa duração nestes componentes.

Neste sentido escreveu Foster, Araújo e Silva (2005, p.759):

“A utilização do hidrogênio com fins energético no Brasil é praticamente inexistente no Brasil, sendo a produção atual voltada em quase sua totalidade para fins industriais”.

“Hidrogênio de uso industrial: a produção de hidrogênio de uso industrial é bastante expressiva nas indústrias de petróleo, alimentícia, de fertilizantes e de aço. Em 2002 foram produzidas 425 mil toneladas de hidrogênio. Em 2004, este valor cresceu, sendo que apenas a Petrobras ultrapassou 180 mil toneladas/ano de hidrogênio produzido nas suas refinarias. Esta produção, se convertida integralmente em eletricidade por meio de células a combustível de 40% de eficiência, geraria mais de 2,4TWh”.

“Hidrogênio para fins energéticos: estima-se que a produção de hidrogênio para fins energéticos esteja em 5.000 m<sup>3</sup>, consumida totalmente nos projetos de demonstração. Os sistemas de eletrólise atuais não são competitivos e a reforma de gás natural só é viável economicamente em grande escala, adequada aos sistemas de muitos MW, mas não às plantas com células a combustível existentes hoje, ainda abaixo de 400 KW. A produção do hidrogênio, a partir da reforma do etanol, gaseificação da biomassa e conversão biológica ainda encontra-se em fase inicial de desenvolvimento. Ademais, não há hoje no Brasil infraestrutura logística para a comercialização do hidrogênio como vetor energético (FOSTER, ARAÚJO, & SILVA, 2005)”.

O melhor desenvolvimento dos projetos de demonstração fará com que o público em geral tome conhecimento desta tecnologia, porém o número de projetos de demonstração no país ainda é muito pequeno. Além do mais, esses projetos podem melhorar a integração entre os grupos de P&D e as empresas, desta forma, desloca-se o nível de pesquisa da básica para a aplicada e para a redução dos custos de produção destes materiais, dispositivos, componentes e sistemas. Em paralelo, esses projetos incentivaria o desenvolvimento nacional de sistemas eletroeletrônicos, como controladores de carga, conversores entre outros.

Desta forma se faz necessário o investimento tanto por parte do governo brasileiro como da iniciativa privada para incentivar a economia do hidrogênio, porém é necessário a superação de alguns gargalos elencados pelo CGEE (2010): equipamentos; concorrência; normas e padrões; tecnologias; institucionalidade.

No Brasil, as empresas que desenvolvem equipamentos relacionados à tecnologia do hidrogênio são normalmente empresas de pequeno porte, possuindo limitações financeiras e de capacidade produtiva. Além disso, a tecnologia do hidrogênio não possui um leque grande de aplicações, o que torna a concorrência das empresas nacionais com as estrangeiras bastante difíceis. Assim, para que as empresas

nacionais tenham chances de competir no mercado externo é preciso gerar ganhos de escala.

Para que as empresas nacionais consigam esse ganho de escala é necessário reduzir os custos, a sugestão da CGEE (2010, p.19) é incentivar a participação dessas empresas como fornecedoras para os projetos de demonstração dessa tecnologia no Brasil. Diante da situação em que o aumento da comercialização das células a combustível no Brasil se deve principalmente pela importação destes sistemas por Universidades, empresas públicas e privadas, governos e institutos de pesquisa, assim é sugerido que o governo especifique um índice mínimo de nacionalização dos equipamentos, evitando assim a importação dessas tecnologias.

Deve-se também ampliar a abrangência das políticas para o desenvolvimento das tecnologias alternativas para geração de energia elétrica. Com isso, poderá haver “a reboque” incentivo para o desenvolvimento da tecnologia do hidrogênio.

De acordo com Dias (2002, p.90), uma forma de acelerar o processo de transição seria incluir nos preços dos combustíveis fósseis a externalidade produzida por sua utilização. Desta forma, o preço final do produto refletiria também os aspectos negativos da utilização dos combustíveis fósseis para o meio ambiente. Assim, de acordo com o autor, “a prioridade a elas [questões ambientais] atribuída vão ser determinantes na transição para o hidrogênio”. Assim a introdução destes custos no preço do combustível fóssil poderá antecipar o processo de transição para o hidrogênio combustível.

O desenvolvimento de equipamentos para a cadeia produtiva do hidrogênio depende em grande parte da habilidade do setor produtivo. Assim é importante incentivar este setor produtivo para o desenvolvimento de novos equipamentos e de tecnologia para serem utilizadas

Assim, deve-se pensar a utilização do hidrogênio como vetor energético no Brasil aliado a uma matriz energética limpa e renovável, principalmente pela utilização do etanol e da hidroeletricidade. Desta forma, pode-se colocar o Brasil em vantagem com relação aos demais países do globo, porque poderá tornar a obtenção do hidrogênio ambientalmente sustentável.

Para que as empresas brasileiras possam concorrer com igualdade de condições com as empresas internacionais é preciso fomentar o desenvolvimento tecnológico.



Este desenvolvimento tem que ter o objetivo de reduzir custos, incrementar a vida útil dos equipamentos e tornar mais eficiente os componentes desta tecnologia, além é claro de desenvolver os sistemas de produção.

Com a intenção de ajudar neste processo, o governo poderá ajudar economicamente as empresas brasileiras que estão inseridas nesta cadeia de produção. Além disso, o incentivo dado para o desenvolvimento industrial de equipamentos elétricos (motores elétricos, inversores de frequência, entre outros) que combinados com as células a combustível, podem aumentar a eficiência do sistema como um todo.

O governo pode atuar também impedindo a entrada de sistemas de produção e de células a combustível completas por meio de aumento da taxa de importação, ao mesmo tempo em que poderia reduzir a carga tributária no caso de importação de equipamentos incompletos e que não são produzidos no Brasil.

“A normatização é um item essencial para a entrada de uma nova tecnologia no mercado” (CGEE, 2010, p. 21). Neste sentido, há no país um esforço em traduzir, adaptar e adotar as normas internacionais, entretanto o volume de normas brasileiras é insuficiente e sua participação na elaboração nas normas internacionais é pequena. Além disso, não existem laboratórios ou instituições de pesquisa que certifiquem os equipamentos e processos desenvolvidos na indústria, nem oferecem treinamento em operação e segurança com certificado.

Para mudar essa realidade brasileira é preciso promover e treinar as autoridades, reguladores, estudantes, pesquisadores, usuários e o público em geral das normas, códigos e padrões, além da segurança. Este treinamento poderá ser oferecido em cursos e workshop específicos, com vistas a incentivar a utilização da metrologia e da qualidade nas aplicações do uso do hidrogênio como vetor energético.

No curto prazo é preciso traduzir e adaptar as normas internacionais sobre a utilização do hidrogênio como vetor energético. Precisa-se também ampliar a participação brasileira na elaboração destas normas internacionais, por meio da participação brasileira nas reuniões plenárias e de grupos de trabalho.

Segundo o CGEE (2010, p. 22), ao governo é sugerido criar uma lei regulatória para o mercado de geração e utilização de energia elétrica a partir do hidrogênio no país. Esta lei possibilitará ao mercado doméstico a compra e venda de energia elétrica. É

preciso também capacitar e autorizar instituições capazes de realizar testes e certificações em componentes e equipamentos desenvolvidos pela indústria nacional.

As tecnologias do hidrogênio ainda não estão plenamente dominadas, possuindo grande espaço para o desenvolvimento. Por isso, espera-se que nos próximos anos ocorra a diminuição dos custos de produção por meio dos ganhos de escala e desenvolvimento tecnológico. Com relação às células a combustível a expectativa é que aumente a vida útil e sua eficiência. Assim a melhoria destas características poderá aumentar o potencial de aplicação desta tecnologia.

Para isso é necessário o desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio e das células a combustível. A CGEE (2010) sugere que sejam reestruturadas as redes nacionais para dar melhor cobertura aos aspectos sugeridos em seus estudos. É preciso também continuar a formação de recursos humanos, além de manter as equipes profissionais dando continuidade aos projetos. É necessário ainda modernizar os laboratórios dos integrantes da pesquisa.

Além dos incentivos à estruturação da economia do hidrogênio, é necessário também incentivar a produção, desta forma na próxima seção será apresentado a parte do documento elaborado pelo CGEE relacionado a este tema.

### **3.1.4 Incentivos para a produção do hidrogênio no Brasil**

A estratégia brasileira presente no Roteiro para a Estruturação do Hidrogênio no Brasil e no Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio está baseada na utilização das fontes renováveis, sendo que a tecnologia para a produção deve-se centralizar na reforma do etanol, gaseificação da biomassa e na eletrólise da água (através de geração de energia elétrica por fontes renováveis).

A produção do hidrogênio através da eletrólise da água já é dominada no exterior, enquanto que no Brasil não existem esses equipamentos. Os países que possuem em sua matriz energética grande concentração de fontes renováveis como é o caso do Brasil, poderão produzir hidrogênio a partir da eletrólise com baixos índices de poluição indireta. As células a combustível que estão sendo desenvolvidas para a

aplicação veicular não admitem impurezas, por isso considera-se que o hidrogênio que abastecerá os veículos deverá ser produzidas por eletrólise da água.

Já o processo de reforma de etanol está em desenvolvimento pré-industrial, precisando de avanços tecnológicos em pesquisas básicas de catalisadores, engenharia de reatores, processos de purificação e balanço de plantas. Embora estas tecnologias sejam promissoras, ainda precisam de muito investimento para superar os gargalos tecnológicos.

No Brasil, a produção de hidrogênio é de aproximadamente 920 mil toneladas por ano, e destinados principalmente para as refinarias de petróleo, a indústria de fertilizante, indústria alimentícia, entre outras. Além disso, a aplicação do hidrogênio como vetor energético é mínimo, e o motivo é a concorrência deste tipo de energia com outras opções energéticas já estabelecidas no mercado.

Atualmente, o hidrogênio utilizado como insumo químico nas indústrias é produzido a partir de fontes fósseis. Este mercado está em expansão e representa um mercado potencial, por isso o desenvolvimento de tecnologias para a produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis pode significar a redução dos impactos ambientais na produção do hidrogênio, mesmo que não sejam usados com fins energéticos.

Ao governo é sugerido para a promoção e desenvolvimento do mercado de hidrogênio como vetor energético a adoção de incentivos, que podem ser feito de oito maneiras (CGEE, 2010, p. 28). 1) colocar na composição do gás natural consumido no Brasil entre 1% a 10% de hidrogênio produzido por fonte renovável. Esta quantidade representa 1,4% a 14% do hidrogênio produzido anualmente no Brasil

2) Substituir os bancos de baterias de grande porte (5KW, 4h) pelo armazenamento de energia em forma de hidrogênio. 3) diminuir a tarifa de energia elétrica para a produção de hidrogênio fora dos horários de pico. 4) reduzir os impostos sobre o etanol que é utilizado na produção de hidrogênio. 5) equilibrar os investimentos entre equipamentos que produzem hidrogênio e dos que consomem. 6) fomentar a aquisição de equipamentos para produção de hidrogênio. 7) incentivar o aproveitamento do hidrogênio que é descartado em forma de subproduto de processos químicos. 8) estender os benefícios da utilização do hidrogênio como

vetor energético para o utilizado com fins químicos, já que isto poderá viabilizar o desenvolvimento de equipamentos para geração de hidrogênio.

Com as tecnologias atuais, a produção do hidrogênio a partir do gás natural, de derivados de petróleo ou de carvão são mais viáveis economicamente. Entretanto, a partir destes insumos há liberação de GEE. Desta forma, é fundamental para o desenvolvimento da economia do hidrogênio a redução dos custos de produção deste vetor energético a partir de fontes limpas e renováveis. No Brasil as principais formas de produção sustentável de hidrogênio no curto e médio prazo são: a Reforma do etanol, a eletrólise da água a partir de fontes renováveis e a gaseificação da biomassa.

A produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água é a maneira mais versátil de se produzir hidrogênio com equipamentos que podem produzir o gás puro numa ampla faixa de produção (0,5 L/min a 100.000 m<sup>3</sup>/h). Para a redução dos custos neste caso é necessário a redução do custo do equipamento e da eletricidade consumida.

Os reformadores de etanol estão em fase de desenvolvimento, sendo sua tecnologia similar à reforma do gás natural, fornecendo quantidades intermediárias de hidrogênio (50m<sup>3</sup>/h a 500m<sup>3</sup>/h), assim é necessário continuar os esforços para desenvolvimento desta tecnologia, em que o Brasil pode se beneficiar destes esforços.

Com relação à gaseificação da biomassa, os processos são adequados somente para equipamentos de grande porte, sendo assim para avançar no desenvolvimento desta tecnologia pode-se adotar um roteiro tecnológico similar ao do reformador de etanol. Deve-se também realizar estudos sobre o uso de biomassas, tanto solidas como liquidas e automatizar o processo de gaseificação. Além de desenvolver catalisadores capazes de remover as impurezas do hidrogênio.

Além do roteiro tecnológico necessário para o desenvolvimento da produção de hidrogênio, são necessárias medidas políticas e institucionais para fortalecimento desses processos de produção.

Segundo o CGEE (2010, p. 31), o governo e suas instituições de fomento devem facilitar o financiamento de produtos e processos relacionados à cadeia de produção do hidrogênio, além de apoiar os laboratórios e empresas de base tecnológica que

querem transformar suas pesquisas com o hidrogênio em produtos. Podem-se abrir também linhas de crédito específico direcionada a aquisição de equipamento e infraestrutura para pequenas e médias empresas envolvidas nesse processo.

Deve-se também instituir o mecanismo de compras governamentais para incentivar o desenvolvimento de tecnologias do hidrogênio, estabelecendo um percentual mínimo de armazenagem em forma de hidrogênio. Aliado a isto, deve-se reduzir a carga tributária incidente no etanol utilizado para produzir hidrogênio, tornando esta rota de produção competitiva frente à rota de produção a partir de fontes fósseis. Fomentar a produção descentralizada de hidrogênio, tanto energético como de uso químico, a partir de fontes renováveis com um índice mínimo de nacionalização.

Outro entrave encontrado pelo relatório do CGEE (2010) foi com relação ao desenvolvimento do transporte e do armazenamento do hidrogênio no Brasil. Assim na próxima seção este tema será visto com mais detalhes.

### **3.1.5 O desenvolvimento do transporte e do armazenamento do hidrogênio no Brasil**

A forma do transporte e do armazenamento do hidrogênio está ligada a estratégia de produção. As possibilidades existentes são a produção centralizada e a descentralizada.

Na produção centralizada, o hidrogênio deve ser distribuído para os centros consumidores, para isso pode ser utilizado o transporte em gasodutos ou através do hidrogênio liquefeito, já no nível local o armazenamento é realizado na forma líquida ou gasosa comprimida.

O Brasil identificou a produção local como prioritária. Independentemente da forma de produção, o armazenamento do hidrogênio na forma comprimida para a utilização final parece ser a tendência natural, entretanto não existe no Brasil uma tecnologia de compressores de alta pressão, bem como não se verificou o desenvolvimento de tanques de armazenamento de alta pressão no Brasil.

As pesquisas para o armazenamento do hidrogênio a partir de nanoestruturas praticamente não existe no Brasil. Além disso, a utilização do hidrogênio para armazenar a energia produzida a partir de fontes intermitentes como a solar e a

eólica podem representar uma grande oportunidade para o desenvolvimento desta tecnologia no Brasil.

Em termos de transporte, o gasoduto é a forma mais econômica para transportar grandes quantidades de gás hidrogênio, porém existem restrições para a implantação e para a consolidação dos gasodutos no mercado do hidrogênio. Como a regulamentação para a construção de gasodutos ainda é restritiva, os custos de implantação são elevados e a disponibilidade de hidrogênio para ser transportada ainda é baixa. Existe ainda a possibilidade de utilização dos gasodutos de gás natural, porém é preciso desenvolver a tecnologia para transporte do hidrogênio.

Para viabilizar este tipo de transporte é preciso rever a regulamentação nacional sobre a construção de gasodutos, e assim diminuir as restrições para construção. É preciso incentivar a produção de hidrogênio perto das usinas hidrelétricas e aumentar a disponibilidade de gás para ser transportado ao centro consumidor, tornando viável sua implantação.

Outro desafio para a cadeia do hidrogênio é conseguir armazenar quantidades significativas de hidrogênio. Para isso, é preciso comprimir o gás para reduzir seu volume para ser inserido em reservatórios com tamanhos reduzidos. No Brasil, não existe fabricantes de compressores de hidrogênio, porém existem fabricantes de compressores para outras aplicações, sendo possível no curto prazo redirecionar esta produção para esta finalidade, podendo ainda incentivar o desenvolvimento tecnológico para comprimir o hidrogênio a pressões mais elevadas (350 bar).

Pelo relatório, é preciso desenvolver os vasos de pressão que são semelhantes aos compressores utilizados para o gás natural. Entretanto, todos esses equipamentos são importados, chegando já montados ou para serem montados no Brasil. Para que possamos ter uma tecnologia nacional de vasos de pressão é necessário desenvolver materiais e métodos de fabricação de cilindros para armazenamento de hidrogênio na forma gasosa com pressão de 350 a 1000 bar.

Fomentar a pesquisa para desenvolver no Brasil nanoestruturas capazes de armazenar hidrogênio por adsorção. Além de fomentar a pesquisa a fim de desenvolver hidretos metálicos. Esses investimentos em pesquisas devem ser direcionados para grupos de PD&I, uma vez que no Brasil, segundo relatório do CGEE (2010), esses grupos quase não existem.

O Transporte e a armazenagem do hidrogênio na sua forma líquida são economicamente viáveis para aumentar a capacidade de distribuição, principalmente quando precisa atingir regiões distantes. Neste estado, ele tem um volume menor<sup>64</sup>, e desta forma ganha mais espaço para o transporte. Além disso, a dificuldade que existia era o isolamento térmico<sup>65</sup>, porém com as novas tecnologias a perda de hidrogênio por evaporação é menor do que 2% em um intervalo de tempo de uma semana. Esta tecnologia já é aplicada em outros países. Entretanto, a falta de regulamentação no Brasil impede os investimentos necessários para o desenvolvimento deste transporte.

Para que o Brasil regulamente este transporte é preciso fazê-lo com base no que tem sido feito na Europa ou nos Estados Unidos, ou ainda adapta-la a realidade brasileira (grandes distâncias, centros urbanos densamente povoados, falta de infraestrutura eficiente rododferroviária). Superando a barreira da regulamentação, já é possível implantar pelo menos uma unidade de liquefação do hidrogênio e que já possui mercado consumidor para ele no Brasil.

Como foi visto no capítulo 2, a utilização do hidrogênio pode ocorrer nos níveis portáteis, estacionária e veicular. Nas aplicações portáteis, os sistemas de célula a combustível podem fornecer energia elétrica para aparelhos eletrônicos de pequeno porte como celular, laptops, entre outros. As tendências internacionais apontam que esta aplicação será a primeira disseminada em grande escala. Primeiro que estas aplicações admitem custos mais elevados, porém comparável ao das baterias empregadas atualmente. Em segundo, o tempo de duração da carga da bateria é maior do que das baterias de hoje. E terceiro, as aplicações militares devem reduzir os custos, beneficiando a economia de escala. Entretanto a CGEE (2010, p. 41) não verificou o desenvolvimento de células a combustíveis para as aplicações portáteis no Brasil.

No Brasil, a geração elétrica estacionária está sendo desenvolvidas principalmente para aplicações de pequeno porte e em interação com fontes alternativas de energia, principalmente as intermitentes como as micro hidrelétrica, com os painéis fotovoltaicos e geradores eólicos, e assim armazenando o hidrogênio para posterior

---

<sup>64</sup>Segundo a CGEE (2010, p. 38), quando o hidrogênio líquido se evapora, ele aumenta 853 vezes o seu tamanho.

<sup>65</sup>já que uma pequena variação da temperatura liberaria o vapor

utilização. Esses sistemas podem servir de suporte para atender as comunidades isoladas.

Nas aplicações veiculares, o desenvolvimento de células a combustível está sendo realizados por grandes montadoras no mundo, além de aplicações em ônibus e empilhadeiras elétricas. No caso das empilhadeiras elétricas, as células a combustíveis se desenvolveram de tal modo que já permitem a sua utilização comercial. Diferentemente do resto do mundo, as aplicações veiculares no Brasil estão mais desenvolvidas no transporte coletivo. Esta tendência é resultado do potencial brasileiro na montagem de ônibus, a necessidade de melhoria do trânsito e a redução da poluição.

Para que o mercado de células a combustível se desenvolva é necessário a redução de custos de fabricação, dos módulos e dos sistemas, já que trata-se do maior problema enfrentado para a consolidação deste mercado. São necessários ainda esforços em pesquisa e desenvolvimento para o aperfeiçoamento dos componentes, produtos, sistemas e processos de fabricação. Este desenvolvimento envolve aumento de desempenho e durabilidade com redução de custos.

Para isso, se faz necessária a continuidade do ProCaC. Entretanto, é recomendável uma reestruturação das redes já estabelecidas, e assim otimizar os objetivos e os recursos públicos, atuando diretamente nas áreas mais promissoras. Capacitar recursos humanos e pensar numa forma de fixar os especialistas nos locais de geração de tecnologia.

O governo, segundo a sugestão do CGEE (2010), deve agir também incentivando a criação de mercado para as células a combustível, devendo ser priorizado pelos próximos 10 anos o mercado estacionário e do Transporte, principalmente o coletivo. Deve-se incentivar a cooperação internacional para acelerar o desenvolvimento tecnológico. O governo pode também incentivar o uso de células a combustível nos sistemas de backup da rede de telecomunicações.

Existe a necessidade dos projetos de demonstração para toda a tecnologia e produtos gerados pelo ProCaC. Estes projetos devem determinar a viabilidade técnico-econômica e gerar confiabilidade na tecnologia para a sua comercialização.

A análise do CGEE (2010) sugere que a falta de informação sobre esta tecnologia representa um entrave para a sua disseminação. Empresários, engenheiros,



técnicos, políticos da área de energia não conhecem a tecnologia da célula a combustível de hidrogênio, outros possuem algum conhecimento, entretanto, sem um maior aprofundamento. Desta forma a tecnologia não é difundida para o resto da sociedade como uma alternativa para a utilização dos combustíveis fósseis, assim os indivíduos não buscam utilizar esta tecnologia simplesmente porque não a conhecem.

Para isso é preciso criar políticas de disseminação da tecnologia de célula a combustível e do conceito de “Economia do Hidrogênio” nas escolas, Universidades, Indústrias, empresas, entre outras. Incentivar a criação de cursos de pós-graduação nesta área com bolsas de estudo. Desta forma, será possível iniciar o processo de disseminação desta tecnologia no Brasil. Ressalta-se que as proposições contidas nos documentos governamentais encontram-se focados, quase que exclusivamente no desenvolvimento de ciência e tecnologia.

### 3.2 O DESENVOLVIMENTO DA ENERGIA DO HIDROGÊNIO NO BRASIL: CONCLUSÕES PRELIMINARES

A produção de energia elétrica a partir do hidrogênio configura-se como uma das melhores soluções tecnológicas para a produção de energia limpa e renovável. No Brasil as iniciativas para implementar esta produção restringem-se ao Governo Federal através de elaboração de estudos prospectivos estratégicos. Os principais desafios à generalização de seu uso ainda constitui-se no elevado custo de produção de energia por esta fonte (para aplicações em estações de energia elétrica, o preço médio em 2010 estava entre US\$ 1.125 e US\$ 1.800 por KW<sup>66</sup>, enquanto que o preço ideal para comercialização é entre US\$ 1.000 e US\$ 1.500 por KW<sup>67</sup>).

O Brasil não apresenta gargalos quanto ao suprimento por fontes de energia, situa-se em vantajosa posição internacional neste aspecto, possui grande potencial para a produção de energia de fontes hídricas e eólicas; grandes reservas de urânio, carvão, petróleo e gás natural; além de possuir conhecimentos para a geração de energia a partir da biomassa e biocombustíveis.

---

<sup>66</sup> Ve IPHE (2011b)

<sup>67</sup> Ver Gomes Neto (2005)

A principal contribuição do hidrogênio poderia estar enquanto complemento no processo de “esverdeamento” da matriz energética brasileira, acompanhando o crescimento da utilização das fontes limpas e renováveis de geração de energia elétrica no país, já que o futuro, a perspectiva é de uso cada vez maior das fontes limpas e renováveis no Brasil, principalmente a solar, eólica, biomassa e hidrogênio.

Porém, a rapidez com que os desafios tecnológicos no campo do suprimento energético vêm sendo superados pelos Estados Unidos, Canadá, Japão e União Europeia, faz com que o Brasil deixe de buscar a liderança em toda a gama de tecnologias da cadeia do hidrogênio, mas que concentre seus esforços em apenas alguns setores. Caso contrário o capital necessário e o tempo de maturação seriam muito elevados, implicando em perdas de oportunidade para a indústria de bens e serviços do Brasil na área energética.

Neste caso seria muito interessante o desenvolvimento da cadeia de produção do hidrogênio a partir da reforma do etanol, já que o Brasil possui grande vantagem comparativa, possuindo o domínio da tecnologia de produção deste biocombustível, além de uma cadeia de distribuição já implementada.

Como a tecnologia da cadeia do hidrogênio ainda não está plenamente estabelecida, faz-se necessário continuar os investimentos em P&D&I através do Programa Brasileiro de Sistemas Célula a Combustível. A presença marcante da energia renovável na matriz energética brasileira transforma o Brasil em um importante ator potencial para a produção do hidrogênio de forma limpa e renovável. De fato, a grande participação das hidrelétricas na geração de energia elétrica pode contribuir para a produção do hidrogênio com baixo custo ambiental. A capacidade de geração de energia dessas hidrelétricas não é plenamente utilizada em determinados horários (devido aos horários de baixa demanda) e em determinadas épocas do ano (devido ao regime de chuvas), assim quando a oferta for superior à demanda, o excedente poderá ser utilizado para a produção do hidrogênio e quando o mercado se inverter, pode-se utilizar o hidrogênio para reequilibrá-lo, transformando o hidrogênio em energia elétrica. Cabe ressaltar que esta opção por armazenamento de energia em grande quantidade através do hidrogênio é mais viável em comparação com os bancos de baterias convencionais.

Empresas pioneiras no setor, a exemplo da HYTRO e ELECTRCELL, ressaltam, entretanto, que grande parte da viabilidade econômica destas tecnologias depende

principalmente de desenvolvimento de equipamentos em empresas, criação de infraestrutura de distribuição, a exemplo, da rede de postos de abastecimento a hidrogênio existentes na Alemanha e Califórnia e em divulgação, estimulando economias de escala via aumento da demanda por hidrogênio. Adicionalmente, na atual política tarifária nacional, o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) para veículos movidos à eletricidade é de 25%, enquanto que para carros populares 1.0 a tarifa é de 7%<sup>68</sup>.

A busca por fontes de energia limpa e renovável tenderá a diversificar a matriz energética brasileira, reduzindo de forma significativa os impactos ambientais, principalmente os oriundos da poluição atmosférica em grandes centros urbanos e poderá deixar o Brasil em vantagem relativamente a outros países que estão desenvolvendo sua tecnologia a partir da reforma de combustíveis fósseis, como o gás natural. Só que para isso é preciso estruturar o mercado de hidrogênio, neste sentido o Roteiro elaborado pelo MME é útil para orientar os atores envolvidos no processo.

Deve-se incluir a iniciativa privada nesse processo, incentivando a participação das empresas ligadas a esta cadeia nas redes de pesquisa do ProCaC, além dos vários institutos de pesquisa, Universidades e órgãos governamentais para aumentar a sinergia entre pesquisa básica, pesquisa aplicada e desenvolvimento de produtos e serviços e prover investimentos em infraestrutura de distribuição e ganhos de escala via ampliação de demanda.

Além disso, as poucas empresas brasileiras envolvidas neste processo são em grande parte pequenas e médias empresas que não possuem poder de mercado. Assim a iniciativa privada brasileira na competição internacional possui desvantagem, já que empresas internacionais que fabricam equipamentos para esta cadeia possuem certo poder de mercado via redução de custos por escala. Em muitos países, o governo onde estas empresas estão alojadas aplicam subsídios a fim de torná-las mais competitivas dificultando ainda mais a concorrência brasileira. Para que haja a redução do preço associado a esta tecnologia pelas empresas brasileiras é preciso à redução dos custos, seja pela adoção de subsídios por parte do governo, seja por ganho de escala da empresa ou através de outro mecanismo de mercado.

---

<sup>68</sup> Decreto Presidencial 6.006, de 28 de dezembro de 2006

Um exemplo da discrepância das políticas públicas é referente ao Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), em que os veículos movidos à eletricidade enquadram-se como “outros tipos” e são taxados em 25%, enquanto para carros populares com motorização 1.0 a tarifa é de 7%. O governo brasileiro poderia mudar a forma de tributação, tornando a utilização do veículo elétrico mais vantajoso, reduzindo este imposto. A Política Tarifária especial poderia se estender para a produção do hidrogênio para fins energéticos, aumentando-se assim, o incentivo para a produção de energia a partir desta fonte.

O Brasil se destaca no cenário internacional pela forte participação de fontes limpas e renováveis na sua matriz energética, principalmente pela energia hidrelétrica e da utilização do etanol combustível. Assim o país vislumbrou a possibilidade de melhorar a utilização destas fontes com o desenvolvimento do hidrogênio como vetor energético. Por isso, as pesquisas são fundamentais para que esta aplicação esteja disponível no mercado. Os números mostram que o país é líder em PD&I nesta cadeia na América Latina, entretanto é preciso aumentar os investimentos (entre 1999 a 2007 os investimentos totalizaram R\$ 134 milhões, o que corresponde entre 25% a 35% dos investimentos realizados por Rússia, ou Índia, ou China ou Coreia do sul), já que o nível de investimento é menor em comparação com outros países, inclusive dos membros do BRIC's. Neste sentido, o governo federal deve apoiar as pesquisas básicas, as pesquisas aplicadas e o desenvolvimento de produtos e serviços, bem como incentivar os projetos de demonstração para o teste desta tecnologia no mercado brasileiro.

Destaca ainda que as iniciativas brasileiras com a elaboração do ProCaC do MCTI e do “Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio” elaborado pelo MME representam um avanço para a cadeia produtiva do hidrogênio. O caminho seguido pelo governo brasileiro ao promover o hidrogênio como vetor energético a ser pesquisado e avaliado como possibilidade vem ao encontro dos anseios mundiais para a utilização de fontes energéticas limpas e renováveis.

O Brasil está no caminho rumo a uma economia menos dependente dos derivados do petróleo com a estruturação destes dois programas governamentais, porém é preciso acelerar ainda mais este processo, haja vista que a pressão causada ao meio ambiente em termos globais está se elevando, devido ao aumento da população e da sua sofisticação de demanda. Para que este processo se acelere

são necessários investimentos ainda maiores para o desenvolvimento desta cadeia, assim a sugestão para o governo brasileiro é investir nos projetos de demonstração, principalmente no transporte público, a fim de tornar a tecnologia mais visível para a população.

A utilização do hidrogênio como vetor energético possibilitará ao país o desenvolvimento da sua matriz energética de forma sustentável alternativamente ao modelo baseado nos combustíveis fósseis. A energia do hidrogênio contribuirá também para garantir que o crescimento econômico necessário para a melhoria da qualidade de vida e do bem estar da população seja mantido, através do melhor aproveitamento das fontes energéticas existentes no Brasil, principalmente a hidroeletricidade. Assim, reduzirá a necessidade de construção de novas usinas e da manutenção de ociosidade das já existentes, podendo contribuir ainda para a redução dos preços da energia elétrica.

Trata-se, portanto, de uma alternativa energética bastante promissora para o desenvolvimento da matriz energética brasileira, tanto que o governo federal tem prospectado a utilização deste vetor através dos MCTI, do MME e do CGEE, embora a energia do hidrogênio ainda não apareça no Plano Decenal nem nas publicações técnicas do Setor Energético: “Análise Energia – Anuário 2012”. O Brasil ainda possui várias opções de fontes para a geração de energia para desenvolver o setor energético e cabe ao governo federal, diante de todas estas possíveis fontes, incentivar o uso das fontes limpas e renováveis e assim contribuir para a promoção do “esverdeamento” deste setor.

O principal desafio para a generalização do uso do hidrogênio como vetor energético está associado ao custo para a produção da energia. O CGEE argumenta que os custos dos equipamentos é uma importante barreira para o desenvolvimento do setor e barateamento dos custos de produção de energia, assim torna-se necessário o investimento em pesquisas que possibilitem a redução de custos destes equipamentos, além de subsídios do governo às empresas desta cadeia produtiva.

A utilização do hidrogênio para a geração de energia no Brasil poderá aproveitar de uma maneira mais eficiente às fontes energéticas renováveis e assim contribuir para baratear os custos da energia elétrica no Brasil, lembrando que ainda é necessário investimentos em pesquisas para baratear os custos dos equipamentos desta cadeia produtiva. Em termos de segurança energética, a produção e uso do hidrogênio por

vários métodos garantirá o acesso a fontes seguras de energia. Além do que, o hidrogênio contribuirá para o maior “esverdeamento” da matriz energética brasileira no longo prazo.

Em síntese, depreende-se da análise, amplo escopo para o Planejamento e Ações para o desenvolvimento energético no Brasil para ir além do foco na segurança energética, mas principalmente para ousar transformar o país em exportador de energia. Da forma observam-se importantes oportunidades para a ampliação da produção de eletricidade a partir do hidrogênio no Brasil, especialmente focadas no financiamento para o barateamento de equipamentos, de criação de infra-estrutura de distribuição e para a ampliação de economia de escala via demanda (por diferenciação tributária e medidas similares).

## CONCLUSÕES

A presente dissertação buscou discutir as principais potencialidades e desafios ao desenvolvimento da energia do hidrogênio no Brasil, buscando inserir no contexto do debate internacional, a busca para desenvolver novas fontes limpas e renováveis de energia de forma alternativa aos combustíveis fósseis. Buscou-se ainda identificar e discutir as iniciativas no Brasil para o desenvolvimento da energia do hidrogênio, numa perspectiva de economia verde, produção de baixo carbono e sustentabilidade do desenvolvimento.

A questão ambiental passou a fazer parte das análises econômicas somente nos últimos cinquenta anos. Antes disso, o modelo de crescimento econômico existente não encontrava limites, se expandindo indefinidamente. Esta produção gerou grandes externalidades negativas para o meio ambiente. A partir da percepção de que este modelo iria exaurir todos os recursos do planeta, houve uma maior atenção dos economistas para a questão ambiental.

Através de um olhar mais amplo, foi conceituado o desenvolvimento sustentável como uma tentativa de aliar o crescimento econômico com a preservação dos recursos naturais. Porém para se chegar a este desenvolvimento é necessário trilhar um caminho que a UNEP estabeleceu como “economia verde”. Como grande parte das emissões mundiais de dióxido de carbono é proveniente da geração de energia, renovam-se os debates acerca do crescimento econômico e demanda energética. Esta nova economia deve buscar fontes alternativas de energia, que seja limpa e renovável e que possibilitará o crescimento econômico sem emissão dos GEE.

De fato, a matriz energética mundial possui grande participação de fontes não renováveis de energia como o carvão e o petróleo, que colaboram para a emissão de poluição. Como a melhoria da qualidade de vida e bem estar da população passa por um crescimento econômico, deve-se buscar substituir essas fontes poluidoras por fontes limpas e renováveis, garantindo assim a sustentabilidade do desenvolvimento.

O Brasil, através do Plano Decenal de Expansão de Energia 2020 (BRASIL, 2012, p. 78) prevê um acréscimo da participação das fontes limpas e renováveis na matriz energética brasileira, passando de 45,5% em 2011 para 46,2% em 2020. De acordo

com este plano, o desenvolvimento do setor energético no Brasil deve se basear em três premissas. 1) garantir o suprimento de energia. 2) garantir um preço adequado para esta energia. 3) contribuir para o “esverdeamento” da matriz energética. O Brasil se encontra em privilegiada posição internacional com relação às fontes energéticas disponíveis para suprir o aumento de demanda que irá ocorrer nos próximos anos. Portanto, não há porque prevê a falta do suprimento de energia no país, a não ser que os investimentos na estrutura de oferta e distribuição não sejam realizados adequadamente.

Neste sentido, a escolha das fontes para o desenvolvimento do setor energético deve-se basear nos próximos anos no aproveitamento do grande potencial de uso de fontes limpas e renováveis, principalmente a hídrica (já que o Brasil possui grande potencial a ser explorado, o preço de produção é um dos mais baixos e trata-se de uma fonte energética limpa e renovável), em detrimento ao uso de fontes poluidoras como o carvão, o petróleo e a nuclear, por serem foco de crescente pressão ambiental. Além disso, o país possui um dos mais bem sucedidos programas de combustível renovável para uso veicular no mundo, o etanol. Neste contexto a busca brasileira pelo domínio da utilização do hidrogênio traria grandes benefícios para o país, já que abriria a possibilidade de produzir o hidrogênio a partir destas fontes limpas, gerando grandes benefícios ambientais para a sociedade.

O atual estágio de desenvolvimento da tecnologia para a cadeia do hidrogênio tem muito que crescer ainda, mesmo nos países considerados ricos, como Estados Unidos, Canadá, Japão e toda a União Europeia, a sua utilização ainda não está consolidada em larga escala, existem apenas alguns projetos que estão sendo desenvolvidos de forma pontual no mundo, porém o número de projetos está em expansão. Neste cenário, a nação que dominar a tecnologia para a utilização do hidrogênio na sua matriz energética terá grande vantagem comparativa com as demais.

Com o intuito de acelerar este processo, o governo brasileiro criou um programa para o desenvolvimento tecnológico e um roteiro para a estruturação da economia do hidrogênio. Embora existam estes documentos governamentais, o investimento realizado pelo Brasil para a pesquisa e consolidação do hidrogênio na matriz energética brasileira ainda é incipiente, conforme demonstrado pelo documento do CGEE.



Pelo roteiro brasileiro, existe um nicho de mercado muito promissor para o Brasil, que é a reforma do etanol para a obtenção do hidrogênio. Como o país é um grande produtor de etanol, possuindo uma cadeia de produção e distribuição já consolidada, o seu uso não geraria grandes investimentos para adequação da estrutura, possibilitando a sua implantação a um custo mais baixo.

Com relação aos custos para a produção de energia a partir do hidrogênio, este ainda não está num estágio de desenvolvimento que permita a comercialização desta tecnologia. No transporte o preço atual (2010) está em 66 dólares por KW, enquanto que o preço ideal para a comercialização é de US\$ 50 por KW. Nas estações de energia o preço está entre US\$ 1.125,00 e US\$ 1.800,00 por KW e o preço ideal para comercialização é de US\$ 1.000,00 a US\$ 1.500,00 por KW. Percebe-se, pois, que os preços para a geração de energia a partir desta fonte energética precisam reduzir por volta de 20% a 30% para que esta tecnologia se torne atrativa para a comercialização.

Os custos dos equipamentos ainda é um empecilho para aplicação desta tecnologia, para isso é necessário mecanismos de fomento para as empresas nacionais poderem se adaptar a esse novo vetor energético, assim poderia reduzir o custo para a geração de energia a partir do hidrogênio.

Tudo aponta para que a longo prazo a solução energética mundial seja voltada para o hidrogênio, independentemente se for obtido a partir de combustíveis fósseis ou de fontes renováveis. Em um primeiro momento é mais provável que o hidrogênio seja obtido a partir da reforma do gás natural, já que a tecnologia está mais acessível, mas é claro que a produção a partir de fontes renováveis é a melhor solução. Neste sentido, a energia do hidrogênio obtida a partir do uso de fontes limpas e renováveis revela-se como uma das melhores técnicas para a produção e distribuição de energia limpa.

De qualquer forma, a utilização do hidrogênio poderá mudar os rumos geopolíticos do planeta, reduzindo a dependência do petróleo. Como o hidrogênio pode ser obtido de vários métodos e insumos, cada região do mundo poderá produzir o hidrogênio a partir das suas possibilidades, pluralizando o acesso a energia

O recurso energético é de fundamental importância para a atividade econômica. Assim, diante de um cenário de transição para a utilização do hidrogênio como vetor

energético, em que as aplicações veiculares, estacionárias e portáteis tendem a mudar a forma como é concebida a energia no planeta, esta transição tecnológica poderá trazer implicações em todas as regiões do mundo em termos sociais, econômicos, ambientais, tecnológicos, políticos e culturais, ou seja, uma mudança paradigmática.

Portanto, o caminho rumo a uma “economia verde” deve passar pelo uso do hidrogênio como combustível, desta forma estaremos em um novo paradigma energético mais limpo e que não comprometa a sustentabilidade do ambiente e da vida na Terra.

## REFERÊNCIAS

ANÁLISE ENERGIA – **ANUÁRIO 2012**, São Paulo, p. 1-249, dez. 2011

ANEEL - **Agência Nacional de Energia Elétrica**. (2010). [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br). Acesso em 23 de novembro de 2010, disponível em Atlas Eólico Brasileiro: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia\\_Eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica(3).pdf)

AMAZONAS, M. C. (2012). **O que é economia ecológica?** Disponível em <http://www.ecoeco.org.br/sobre/a-ecoeco>. Acesso em 10 de maio de 2012.

AMAZÔNIA (08 de fevereiro de 2012). Disponível em [www.amazonia.org.br](http://www.amazonia.org.br). Acesso em 07 de junho de 2012.

BINSWANGER, H. C. (2002). Fazendo a sustentabilidade funcionar. In: CAVALCANTI, C. (Org). **Meio ambiente, desenvolvimento sustentável e políticas públicas** 4. Ed. São Paulo: Cortez; Recife: Fundação Joaquim Nabuco.

BNDES - **Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social**. ( 27 de outubro de 2011). Disponível em: [www.plataformabndes.org.br](http://www.plataformabndes.org.br). Acesso em 07 de junho de 2012.

BOTO, R. (outubro de 2007). **Encontro Nacional de Negócios em Energia**. Acesso em 20 de fevereiro de 2012, disponível em Encontro Nacional de Negócios em Energia: [www.usinacoruripe.com.br](http://www.usinacoruripe.com.br)

BRASIL – Ministério da Ciência e Tecnologia (2002), **Programa Brasileiro Sistemas Célula a Combustível**. Brasília: MCTI

BRASIL - Ministério de Minas e Energia. (2005). **Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil**. Acesso em 20 de novembro de 2011, disponível em MME: <http://www.mme.gov.br>

BRASIL. (2011a). Ministério de Minas e Energia. **Balanço Energético Nacional 2011: ano base 2010**. Rio de Janeiro: MME.

BRASIL. (2011b). Ministério de Minas e Energia. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2020 - Sumário**. Rio de Janeiro: MME.

CABRAL, J. B., & Murphy, C. C. (2009). **H2 Brasil**. Acesso em 20 de janeiro de

2012, disponível em H2 Brasil: <http://www.h2brasil.com/energia-renov%C3%A1vel.php>

CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (19 de julho de 2010). **Air Resources Board**. Acesso em 03 de março de 2012, disponível em The State of California: <http://www.arb.ca.gov/msprog/bus/zeb/zeb.htm>

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. (2002). **Programa brasileiro de células a combustível**. Brasília: CGEE.

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. (2010). **Hidrogênio energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade 2010-2025**. Brasília: CGEE.

COHEN, Claude Adélia Moema Jeanne. **Padrões de consumo: desenvolvimento, meio ambiente e energia no Brasil**. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

DALCOMUNI, S. M. (1997). **Dynamic capabilities for cleaner production innovation: the case of the market export pulp in Brazil**. Sussex: University Sussex.

DALCOMUNI, S. M. (2005). Nanotecnologia, inovação e economia. In: P. R. Martins, **Nanotecnologia, sociedade e meio ambiente** (pp. 85-148). São Paulo: Associação Editorial Humanitas.

DALCOMUNI, S. M. (2012). **Sustentabilidade, Economia Verde e pagamento por Prestação de Serviços Ambientais (PSAs): O Projeto Produtores de Água no Espírito Santo**. 2012 (Obra inédita submetida ao 50º Congresso da SOBER em Vitória – julho de 2012).

DALY, H. E. (1974). **The Economics of the Steady State**. The American Economic Review, 64, 15-21.

DALY, H. **Steady-State Economics: A New Paradigm**. New Literary History, Vol. 24, nº. 4, Papers from the Commonwealth Center for Literary and Cultural Change, Autumn, 1993. P. 811-816.

DBC Educacional. (s.d.). **Oxigênio**. Acesso em 22 de novembro de 2011, disponível em Projeto Educacional: [www.oxigenio.com](http://www.oxigenio.com)

DIAS, J. S. (2002). **Hidrogênio e Fuel cells: Bases de um novo paradigma energético?**. Acesso em 22 de julho de 2011, disponível em Departamento de prospectiva e planejamento e relações internacionais -DPP: [http://www.dpp.pt/Lists/Pesquisa%20Avanada/Attachments/1237/infor\\_inter\\_2002\\_III](http://www.dpp.pt/Lists/Pesquisa%20Avanada/Attachments/1237/infor_inter_2002_III)

.pdf

ECODESENVOLVIMENTO ( 23 de agosto de 2011). Disponível em: [www.ecodesenvolvimento.org.br](http://www.ecodesenvolvimento.org.br). Acesso em 07 de junho de 2012.

FEITOSA, P. H. (2010). **A transição tecnológica rumo à economia do baixo carbono**: o papel da energia solar fotovoltaica. Dissertação de mestrado. Vitória: UFES.

FOSTER, M. S., ARAÚJO, S. C., & SILVA, M. J. (junho de 2005). **Estruturação da economia do hidrogênio no Brasil**. Acesso em 20 de julho de 2011, disponível em Centro de Gestão e Estudos Estratégicos CGEE: <http://cncti3.cgee.org.br/Documentos/Seminariosartigos/Areasintrnacional/DraMaria%20das%20Gracas%20Silva%20Foster.pdf>

FREEMAN, C., & SOETE, L. (1997). **The economics of industrial innovation** (3ª ed.). London: Pinter.

GEORGESCU-ROEGEN, N. (janeiro de 1975). **Energy and economic myths**. Southern Economic Journal , 41.

GEORGESCU-ROEGEN, N. (1999). **The Entropy law and the economic process**. Cambridge, Mass .

GOMES NETO, E. H. (2005). **Hidrogênio, evoluir sem poluir**: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível. Curitiba: Brasil H2 Fuel Cell Energy.

GORGULHO, G. (23 de abril de 2011). **Fabricantes prometem carro a hidrogênio até 2015, mas governo dos EUA aposta nos elétricos**. *Inovação Unicamp* . Campinas, São Paulo, Brasil.

HERMES, N. A. (2010). **Hidrogênio e nanotubos de carbono por decomposição catalítica do metano**: desempenho de catalisadores à base de cobalto e alumínio. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

IEA- Internacional Energy Agency. (2009). **World Energy Outlook**. Acesso em 10 de dezembro de 2011, disponível em World Energy Outlook: <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/weo2009.pdf>

IEA (2011). **Renewables Information 2011 edition**, Internacional Energy Agency, OECD Publishing, Paris.

IEA- Internacional Energy Agency. (2011). [www.iea.org](http://www.iea.org). Acesso em 20 de janeiro de

2012, disponível em Internacional Energy Agency - IEA : <http://www.iea.org/stats/index.asp>

IPAM – Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia. (2011). **A Região da Transamazônica rumo à economia de baixo carbono:** estratégias integradas para o desenvolvimento sustentável. Brasília: FVPP

IPHE - International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy. (1º de Março de 2011a). **Renewable Hydrogen Report**. Tokyo, Japão.

IPHE - International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy. (1º de Março de 2011b). **4th IPHE Workshop Report Stationary Fuel Cells**. Tokyo, Japão.

KEMP, R. (1996). The transition from hydrocarbons. The issues for policy, in: S. Faucheux, D. Pearce and J.L.R. Proops (eds.), **Models of Sustainable Development**, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, p. 151-175.

LOVINS, A. B.; D.W. Brett. **From Fuel Cells to a Hydrogen-based Economy**. Public Utilities Fortnightly. Vol. 139, Nº4. 15 fev. 2001. P.15

MANAGÓ B. L. DOMICIANO S. M. (2009). **A influência das nuvens no clima do planeta**. Campus Irati: Unicentro.

MCKINSEY & COMPANY. **Pathways to a Low-Carbon Economy:** version 2.1 of the global greenhouse gas abatement cost curve. Disponível em: <<http://www.mckinsey.com/>>. Acesso em: 11 de maio de 2012.

MELLO, J. C. **Meio ambiente, educação e desenvolvimento**. Washington: Organização dos Estados Americanos. 1996 (Programa Regional de Desenvolvimento Educacional - REDE/OEA). Interamer nr. 60 – série educativa.

MERICO, L. F. (2002). **Introdução à economia ecológica** (2ª ed.). Blumenau: Edifurb.

MOTTA, Ronaldo Seroa da. **Economia ambiental**. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2006.

NEVES, P. C., Corrêa, D. S., & Cardoso, J. R. (2008). **A classe mineralógica das combinações orgânicas associadas ao hidrogênio**. *Terra e Didática*, 51-66.

NOVA AMBI. **Nova ambiental**. Disponível em: <<http://www.novaambi.com.br>> Acesso em 14 abr 2012.

OIT – Organização Internacional do Trabalho. (2009). **Programa Empregos Verdes**. Brasília: OIT

PAVESE, H. B. (2011). Delineamentos de uma “economia verde”. **Política**

**Ambiental: “economia verde”, desafios e oportunidades**, 15-23.

PINTO JUNIOR, H. Q. (2007). **Economia da Energia**: fundamentos econômicos. Rio de Janeiro: Elsevier.

PORTAL Brasileiro de Energias Renováveis. (2011). Acesso em 28 de fevereiro de 2012, disponível em Portal Brasileiro de Energias Renováveis: <http://energiarenovavel.org>

PORTAL G1. (25 de outubro de 2010). **Dinamarca desenvolve bateria ilimitada para carros elétricos**. Acesso em 03 de março de 2012, disponível em G1: <http://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2011/10/dinamarca-desenvolve-bateria-ilimitada-para-carros-eletricos.html>

RANGEL JUNIOR, E. M. (2006). **Hidrogênio neutro em galáxias espirais**. Dissertação de mestrado. Vitória: UFES.

RIBOLDI B. M. **Nanotecnologia**: fundamentos e aplicações. UNESP. Rio Claro.

Rifkin, J. (2003). *A economia do hidrogênio: A criação de uma nova fonte de energia e a redistribuição do poder na Terra* (1 ed.). (M. M. Filho, Ed., & R. M. Santos, Trad.) São Paulo: M. Books do Brasil.

RIO +20. (2011). *RIO +20*. Acesso em 20 de abril de 2012, disponível em RIO +20: <http://www.rio20.gov.br>

ROMEIRO, A. R. (2003) Economia ou economia política da sustentabilidade. In MARY, P. H. e LUSTOSA, M. C. e Vinha, V. da. In **Economia do meio ambiente**; teoria e prática. Rio de Janeiro: Elsevier,

SANTO ANTONIO ENERGIA. (2012). Disponível em: [www.santoantonioenergia.com.br](http://www.santoantonioenergia.com.br). Acesso em 07 de junho de 2012.

SANTOS, F. M., & Santos, F. A. (2005). **O combustível "hidrogênio"**. Millenium - educação, ciência e tecnologia , 284.

SCHNEIDER, F; KALLIS, G; MARTINEZ-ALIER, J. (2010). **Crisis or opportunity? Economic degrowth for social equity and ecological sustainability**. Introduction to this special issue. Journal of Cleaner Production. n°.18, , p. 511–518.

SILVEIRA, S. J. C. da, (2006). **Externalidades negativas**: as abordagens neoclássica e institucionalista. Revista FAE, Curitiba, v.9, n.2, p.39-49, jul./dez.

SORRELL, S.( 2007) **The Rebound Effect**: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency,. Disponível em: <<http://www.ukerc.ac.uk/>>. Acesso em: 2 de junho de 2012.

STERN, N, (2007). **The Economics of Climate Change**: the Stern review. Cambridge: Cambridge University Press.

THE COLUMBIA ENCYCLOPEDIA. (2001). **The Columbia Encyclopedia** (6ª Edição ed.). Columbia: Columbia University Press.

TRANSPORT FOR LONDON. (03 de março de 2012). **Transport for London**. Acesso em 03 de março de 2012, disponível em Transport for London: <http://www.tfl.gov.uk/corporate/projectsandschemes/2019.aspx>

UNDP – United Nations for Development Programme. **Energy for sustainable development**: Policy agenda. 2002: UNDP.

UNEP - United Nations Environment Programme. (fevereiro de 2011). **Towards a Green Economy**: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication. Acesso em 20 de abril de 2012, disponível em UNEP: [www.unep.org/greeneconomy](http://www.unep.org/greeneconomy)

UNIVERSIDADE DOS AÇORES. (s.d.). **LAMTec**. Acesso em 04 de dezembro de 2011, disponível em Laboratório de Ambiente Marinho e Tecnologia: <http://www.lamtec-id.com/energias/hidrogenio.php>

VEIGA, J. E. (2009). **Mundo em transe**: do aquecimento global ao ecodesenvolvimento. Campinas: Editora Autores Associados.